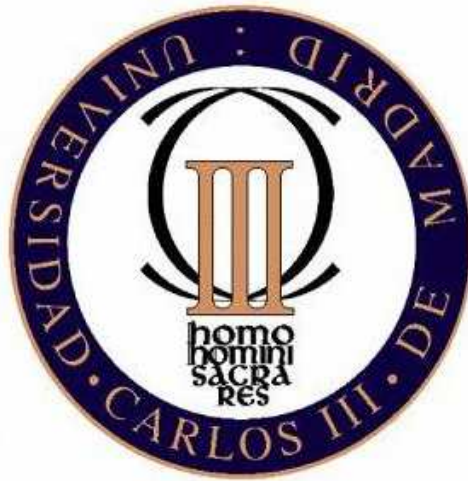


UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

ÁREA DE INGENIERÍA MECÁNICA



PROYECTO FIN DE CARRERA:

**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE MECANIZADO POR TORNO A
ALTA VELOCIDAD DE LA ALEACIÓN *INCONEL 718***

Autor: David García Balsa

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL: MECÁNICA.

Tutor: Xavier Soldani

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA.

Leganés, Febrero 2010



INDICE

INTRODUCCIÓN.	4
1. Proceso de mecanizado como un proceso de fabricación.	5
1.1. Definición de mecanizado.	6
a) Movimientos para el arranque de viruta en el mecanizado.	8
1.2. Parámetros fundamentales en el corte.	10
a) Caso particular: Corte ortogonal en torno.	11
1.3. Mecanismo de formación de la viruta.	20
1.4. Dinámica y Cinemática en el corte ortogonal.	26
1.5. Efectos de la velocidad de corte:	32
1.5.1. Efecto de la velocidad de corte sobre la morfología de la viruta generada.	32
a) Resultados de otros estudios: <i>Acero (AISI1045)</i> , <i>Aluminio (AA7075)</i> , <i>Titanio (TiAl6V4)</i> .	36
1.5.2. Efecto de la velocidad de corte sobre las fuerzas en el corte.	39
2. Introducción al método de los elementos finitos (MEF); Características del modelo, ecuación constitutiva de Jonson-Cook.	41
2.1. Características básicas del modelo.	42
a) Mallado del modelo; tipo de malla, tamaño y zonas redefinidas.	43
b) Geometría del corte; ángulos de la herramienta.	44
c) Parámetros del corte; velocidad de corte, tiempos de corte, fricción, condiciones de contorno.	45
2.2. Criterios de rotura dinámica y Ley constitutiva del material implementada.	46
a) Material: INCONEL718.	49
3. Descripción de las simulaciones realizadas y resultados a obtener.	51



a) Bloque JC^0 .	52
b) Bloque $JC0'$.	53
c) Bloque JC^I .	54
4. Análisis de los resultados obtenidos.	56
a) Resultados de las Fuerzas de Corte y Fuerzas de Avance de las simulaciones del <i>bloque</i> JC^0 .	56
b) Resultados de las Fuerzas de Corte y Fuerzas de Avance de las simulaciones del <i>bloque</i> JC^I .	60
c) Análisis de la frecuencia de aparición de la banda primaria de cizalladura para las simulaciones de los <i>bloques</i> JC^0 y JC^I .	62
d) Análisis local del ancho de la banda de cizalladura para los casos del <i>bloque</i> JC^0 .	68
e) Resultados de las Fuerzas de Corte y Fuerzas de Avance para las simulaciones del <i>bloque</i> $JC0'$.	73
f) Análisis de la frecuencia de aparición de la banda primaria de cizalladura en los casos del <i>bloque</i> $JC0'$.	77
g) Análisis local del ancho de la banda de cizalladura en los casos del <i>bloque</i> $JC0'$.	79
h) Estudio de las longitudes de contacto entre viruta y herramienta para las simulaciones del <i>bloque</i> JC^0 y JC^I .	82
i) Análisis de la morfología de la viruta generada durante el corte para las simulaciones del <i>bloque</i> JC^0 , $JC0'$ y JC^I :	85
- Morfología de la viruta en función de la velocidad de corte para JC^0 .	85
- Morfología de la viruta en función de la velocidad de corte para JC^I .	88
- Influencia de los parámetros C , n y m de <i>Johnson-Cook</i> en la morfología de la viruta.	90
5. Conclusiones.	94
6. Trabajos futuros.	100
8. Referencias bibliografía y documentación.	101



INTRODUCCIÓN

El objeto de este proyecto es presentar y utilizar un modelo numérico del mecanizado por arranque de viruta, del material INCONEL 718 realizado mediante la herramienta ABAQUS/CAE. En el modelo se incluye la simulación de corte ortogonal (2D).

El propósito es lograr un conocimiento mayor del proceso, que ayude en la correcta definición de los parámetros de corte para este material.

Destacar que el trabajo realizado es bastante experimental y esta basado en simulaciones mediante elementos finitos (MEF), para finalmente desarrollar y llegar a conclusiones útiles de índole experimental.

Para ello se ha partido de un modelo inicial, a raíz del cual, variando diferentes parámetros característicos del proceso de torneado y del material, obtener resultados generales del proceso final.

Aspectos y magnitudes importantes que se tratan en este proyecto son; *velocidades* a las que se realiza el corte, *fuerzas de corte* en el proceso, *morfología* de la viruta, capacidad y velocidad de deformación del material, características de la banda de cizalladura principal así como su frecuencia de aparición, y longitudes de contacto en la interfase viruta – herramienta.

Objetivos:

- Analizar si el modelo es valido para simular el comportamiento del material INCONEL 718 en el proceso de mecanizado a alta velocidad por torno en corte ortogonal, mediante la herramienta de elementos finitos ABAQUS.
- Estudiar el efecto de la variable independiente (*velocidad de corte*) sobre distintas variables dependientes (fuerza de corte, ancho de banda de cizalladura, frecuencia de aparición de esta banda, longitud de contacto entre viruta y herramienta y morfología de la viruta generada).
- Caracterizar el comportamiento del material mediante una expresión empírica implementada en ABAQUS, que es la ley constitutiva del material de *Johnson-Cook*. Sobre esta, se variarán parámetros, como la sensibilidad del material con la temperatura (m), el factor de endurecimiento por deformación (n), la sensibilidad del material a la velocidad de deformación (C), y se analizara su influencia sobre las variables anteriormente citadas.



1. PROCESO DE MECANIZADO COMO UN PROCESO DE FABRICACION.

El proceso de mecanizado es un proceso de fabricación que, partiendo de una materia prima y aportándole un valor añadido (figura 1.1.0.), obtiene un producto diferente, el cual, en principio, satisface unas necesidades del propio fabricante o de su cliente.

Un proceso de fabricación exige la interacción de:

- Material.
- Maquina herramienta.
- Energía.
- Tecnología.

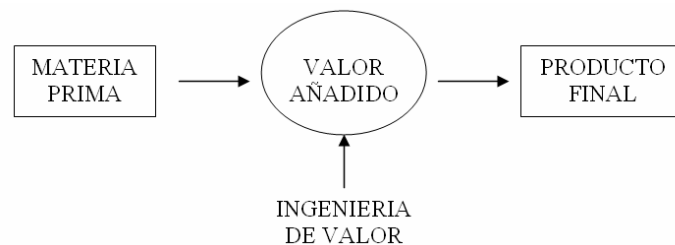


FIGURA 1.1.0. Imagen proceso fabricación.

Todo proceso de fabricación comprende gran variedad de materias y campos de actuación, y por ello un gran numero de alternativas para su clasificación, como por ejemplo en función de: producto final obtenido, material sobre el que se trabaja, sector industrial al que se destina el producto, características del proceso, maquina y herramienta utilizada, grado de calidad del producto obtenido, entre otras.

Dentro de las diferentes alternativas de clasificación, la que se encarga de definir un proceso de fabricación según las características del proceso, es uno de los procedimientos clásicos que a grandes rasgos distingue entre:

- Conformado por eliminación de material.
- Conformado adhiriendo nuevo material.
- Conformado deformando plásticamente la materia inicial.

Es en el primer conjunto donde se encuentra definido el proceso de **mecanizado**, que abarca gran diversidad de posibilidades, entre las cuales las más importantes según la maquina utilizada son: tipo torno, tipo fresadora y tipo taladradora.

1.1. DEFINICION DE MECANIZADO.

El mecanizado es un proceso de conformado consistente en la eliminación de material o arranque de viruta, mediante un filo y a partir de una pieza de materia prima inicial, para conseguir determinadas formas y tamaños en una pieza final.

Dependiendo de la morfología del filo de la herramienta se pueden distinguir procesos de mecanizado con *filos geoméricamente determinados* y procesos con *filos no determinados* (figura 1.1.1.). En el primer caso la viruta se genera gracias a uno o varios filos bien determinados y en el segundo gracias a herramientas con filos geoméricamente sin determinar como pueden ser granos abrasivos.

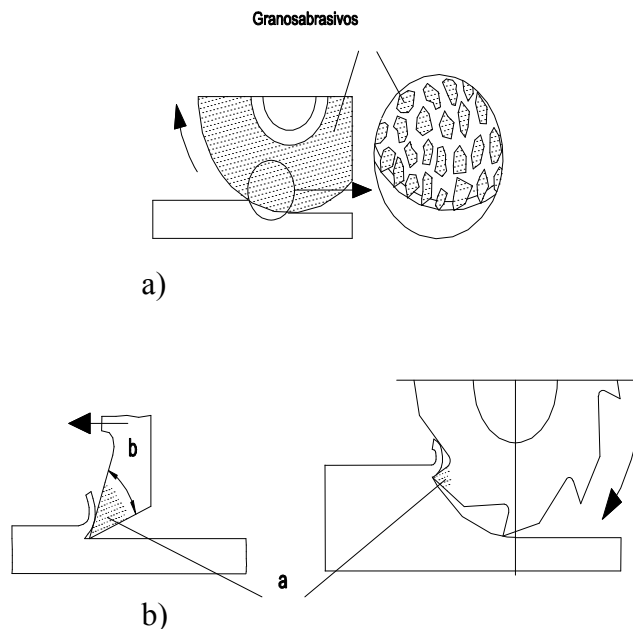


FIGURA 1.1.1. a) Filos no determinados; b) Filos geoméricamente determinados [1].

Estos procesos de mecanizado se realizan en la actualidad mediante maquinaria industrial basada principalmente en: *maquina herramienta, herramientas de corte* y los *elementos de sujeción*.

En función del movimiento relativo entre la maquina-herramienta y la pieza, se clasifican tres procesos de mecanizado con perdida de material:



Torneado:

Se obtiene la geometría deseada mediante la combinación de los movimientos de giro de la pieza y el desplazamiento de la herramienta de corte de un solo filo (*figura 1.1.2.*). Este tipo de proceso es particularmente eficiente para la obtención de piezas de revolución con simetría axial.

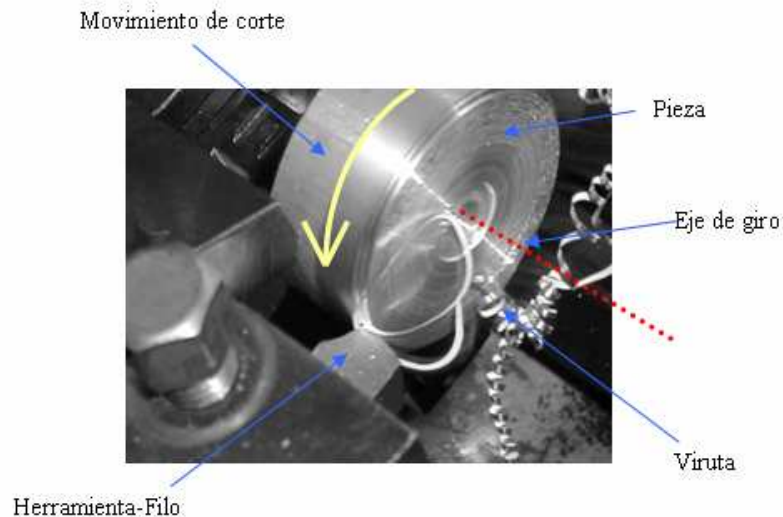


FIGURA 1.1.2. Proceso de torneado.

Fresado:

Mediante una herramienta que gira sobre su eje ya sea de forma vertical u horizontal y que consta de varios filos se arranca el material (*figura 1.1.3.*). Es posible jugar con los movimientos relativos entre elementos, desde giro de herramienta y desplazamientos del material, hasta un soporte fijo y únicamente giro de la herramienta. Este proceso abarca una gran variedad de operaciones.

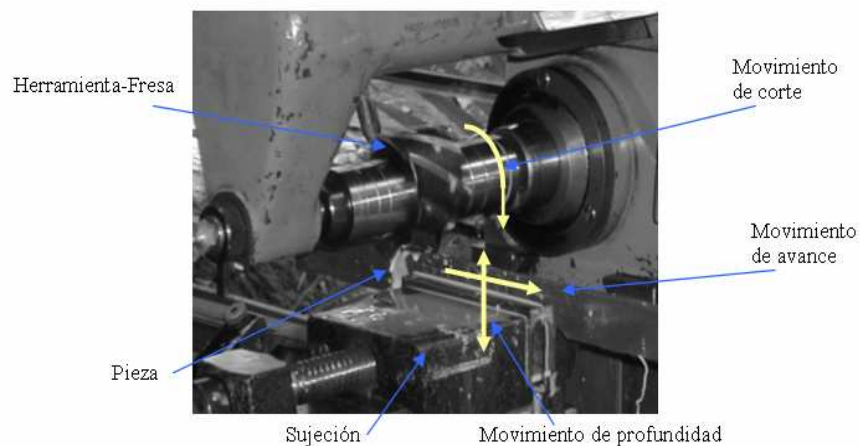


FIGURA 1.1.3. Proceso de fresado.



Taladrado:

El termino taladrado abarca todos los métodos utilizados para generar un agujero cilíndrico en la superficie de la pieza. Aquí la herramienta rota y avanza en la dirección del eje de rotación (*figura 1.1.4.*). La operación mas común es el taladrado con broca, aunque también es posible realizar operaciones como el roscado y acabado (escariado y bruñido).

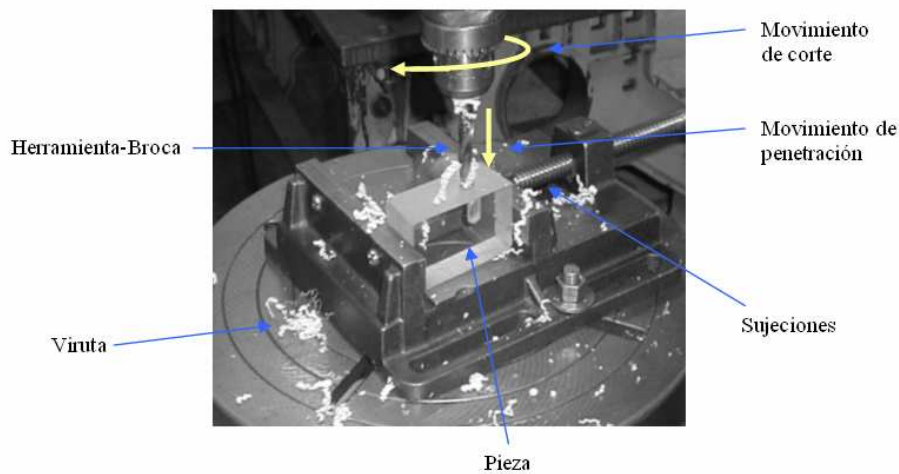


FIGURA 1.1.4. Proceso de taladrado.

MOVIMIENTOS PARA EL ARRANQUE DE VIRUTA EN EL MECANIZADO.

En los procesos de arranque de material y formación de viruta, es fundamental que se generen movimientos relativos entre la herramienta de corte y la pieza a mecanizar, de tal forma que se produzca una interacción entre ellas. Combinando las posibilidades de movimiento entre ambos elementos, podemos mecanizar:

- Manteniendo la pieza quieta y moviendo la herramienta.
- Manteniendo la herramienta quieta y moviendo la pieza.
- Moviendo ambas.



Más concretamente y para conseguir arrancar el material en forma de viruta, son necesarios los siguientes tipos de movimientos básicos (*figura 1.1.5*):

1. *Movimiento de corte*: es aquel que, sin movimiento de avance, solo arranca viruta durante una revolución (si el movimiento es circular: torneado, fresado) o durante una carrera (si el movimiento es rectilíneo, como el cepillado).
2. *Movimiento de avance*: que, combinando con el corte, hace posible el arranque continuo de virutas.
3. *Movimiento de penetración*: determina la profundidad del corte y, por tanto, el espesor o ancho de la viruta que se desprende.
4. *Movimiento de aproximación*: no es un movimiento de mecanizado, con el no se arranca material. Son el conjunto de movimientos que realiza la herramienta para colocarse en la posición exacta antes de iniciarse el corte y empezar a mecanizar.

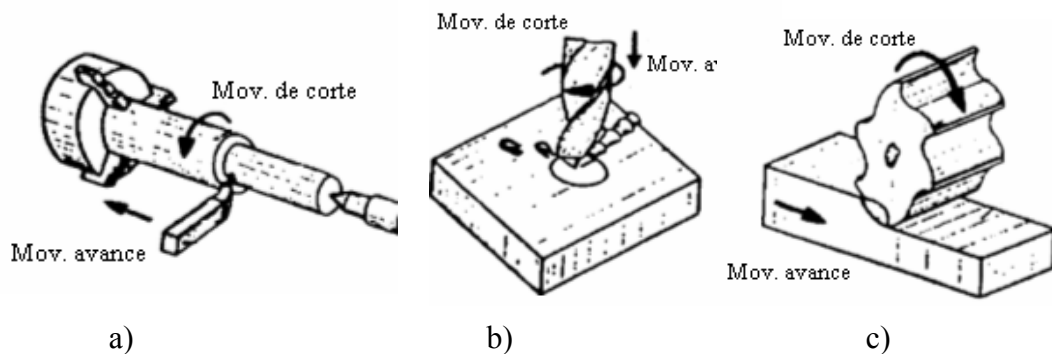


FIGURA 1.1.5. Movimientos principales; a) Torneado. b) Taladrado. c) Fresado [4].



1.2. PARÁMETROS FUNDAMENTALES EN EL CORTE.

Los parámetros de corte, son las magnitudes tecnológicas necesarias, a las cuales hay que asignar valores determinados, para conseguir realizar el proceso de arranque de viruta de forma óptima.

Velocidad de corte (V_c): Es la velocidad lineal relativa de la herramienta respecto de la pieza, en la dirección y sentido del movimiento de corte. Normalmente se mide en (m/min).

Este parámetro es bastante importante y se puede variar dentro de unos rangos determinados en función de las características del proceso y del material, teniendo en cuenta que si es excesivamente baja, la productividad es muy pequeña; si, por el contrario, se trabaja a demasiada velocidad de corte, la herramienta se desgastara rápidamente.

Mediante ensayos experimentales, los fabricantes de herramientas son capaces de facilitarnos unos valores orientativos, en función del material de la herramienta, material de la pieza, la sección de la viruta, la refrigeración, el tipo de construcción de la máquina, entre otros.

A partir de este dato (V_c) se calculan las revoluciones por minuto a las que debe girar la pieza o la herramienta, en este caso, el *torno*.

$$v_c = \frac{\pi n D}{1000} \quad (Ec\ 1.2.1.)$$

Siendo:

V_c = Velocidad de corte en (m/min).

D = Diámetro de la pieza (torneado) o de la herramienta (fresado, taladro) en (mm).

n = Revoluciones de la pieza (torneado) o de la herramienta (fresado, taladrado) en un minuto (r.p.m).



Avance (a): El avance es el desplazamiento relativo herramienta-pieza en cada revolución o carrera. Se expresa en (mm). Conocidos la velocidad de giro (rpm) y el avance (a en mm), se calcula la velocidad de avance (Va), que se suele expresar en milímetros por minuto (mm/min). Su cálculo se realiza mediante:

$$v_a = an \quad (\text{Ec 1.2.2.})$$

Profundidad de corte (p): La profundidad de corte o profundidad de pasada (p) es la distancia que penetra la herramienta en la pieza a mecanizar, se expresa en (mm).

Con la profundidad de corte conocida (p) y el avance (a), podemos conocer la sección de la viruta (S), medida en (mm²).

$$S = ap \quad (\text{Ec 1.2.3.})$$

CASO PARTICULAR: CORTE OTOGONAL EN TORNO.

Dentro del proceso de mecanizado por torno, se diferencian dos tipos de corte en función del posicionamiento de la herramienta respecto a la superficie a mecanizar, y que van a afectar a la formación de la viruta.

Definimos el *corte ortogonal*; como el tipo de corte en el cual, el filo de la herramienta es perpendicular a la dirección del movimiento de corte principal. En comparación esta el *corte oblicuo*, donde el filo de la herramienta tiene cierto ángulo de inclinación respecto a la dirección de desplazamiento relativo de la herramienta-pieza. (figura 1.2.1.).

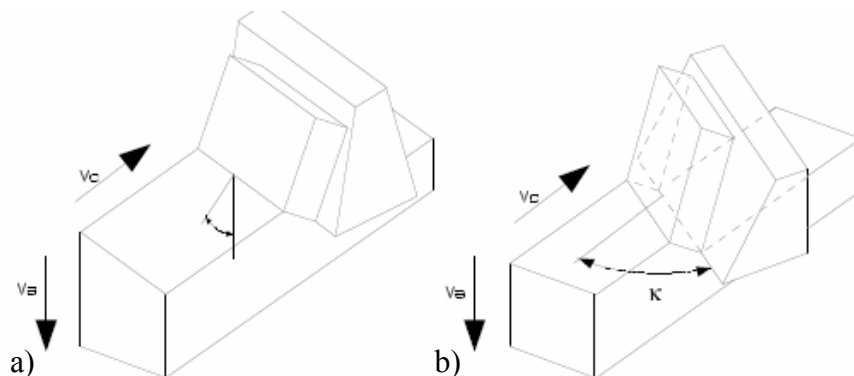


FIGURA 1.2.1. a) Corte ortogonal; b) Corte oblicuo.



En este proyecto, se va a trabajar sobre las bases teóricas del corte ortogonal, ya que es el proceso mas simplificado para comprender el arranque de material en forma de viruta, y por lo tanto el primer pasó a dar en el análisis, para llegar a unas conclusiones iniciales.

Sobre este tipo de corte, existen diferentes aspectos teóricos y experimentales, que se deben conocer de antemano para iniciar cualquier investigación o análisis sobre el mismo.

El proceso de corte ortogonal aplicado al mecanizado por torno, implica que la dirección de la velocidad de corte sea perpendicular al filo de la herramienta. Como se ha comentado, esta es una visión muy simplificada y además es empleada solo en algunas operaciones, como por ejemplo, algunos cepillados y refrendados. Esto cambia considerablemente las condiciones geométricas y altera la salida de la viruta.

Destacando algunas de las simplificaciones que se consiguen con el corte ortogonal, comentar, que con este modelo se generan la misma composición de fuerzas, sea el plano que sea, paralelo al que muestra la *figura 1.2.2*.

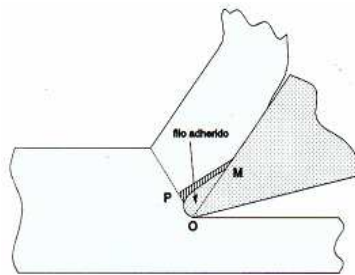


FIGURA 1.2.2. Plano de referencia en el corte ortogonal [22].

Esta suposición es razonablemente aproximada y considera un comportamiento *totalmente homogéneo del material* así como un *estado de deformaciones planas* [5].



En el procedimiento por corte ortogonal y en la herramienta utilizada, existe elementos y partes fundamentales, las cuales es importante que queden bien diseñadas y definidas (*figura 1.2.3.*):

- El *filo o arista* cortante.
- La *superficie de desprendimiento*, que es la cara de la herramienta sobre la que desliza al material mecanizado o viruta.
- La *superficie de incidencia*, que es la cara de la herramienta que queda frente a la superficie trabajada de la pieza.
- La *superficie o plano de cizalladura*, es una zona teóricamente localizada y definida por un ancho de banda (ω) y un ángulo (ϕ). Es aquí donde se generan los esfuerzos tangenciales en el material que irán deformando plásticamente la pieza hasta llegar a la rotura, y que en la práctica se reduce a un plano.

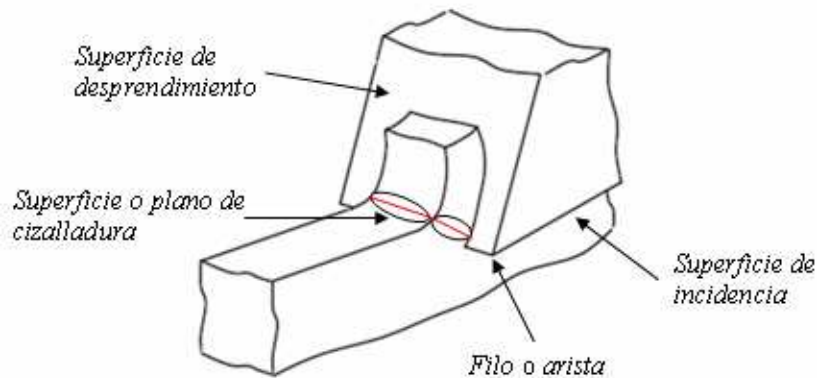


FIGURA 1.2.3. Superficies y elementos fundamentales en el corte.



La geometría y los parámetros que caracterizan al corte ortogonal, son (figura 1.2.4.):

Geométricamente:

- El ángulo de desprendimiento (γ).
- El ángulo de incidencia (α).
- El ángulo de filo (β).
- Espesor de viruta deformada (a_d).
- El ángulo de deslizamiento o cizalladura (ϕ). Factor de recalcado (C_r).

Parámetros:

- La velocidad de corte (v_c).
- El avance (a).
- El comportamiento del material.

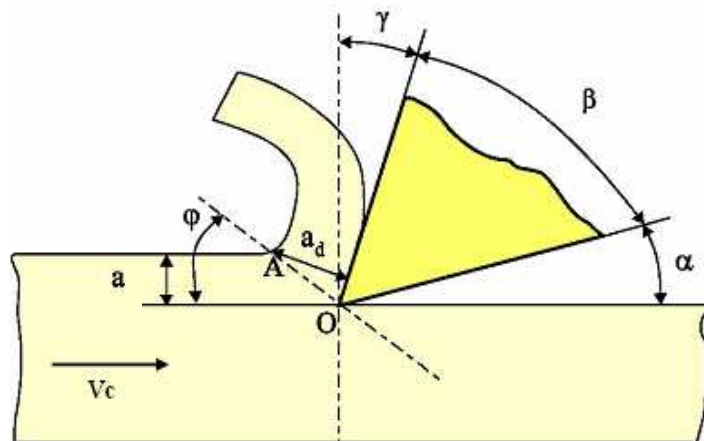


FIGURA 1.2.4. Geometrías y parámetros del corte ortogonal [4].



Angulo de desprendimiento (γ):

Es el ángulo formado entre la superficie de desprendimiento de la herramienta y la perpendicular a la dirección del corte. Su valor está directamente relacionado con el nivel de deformación de la viruta. Este ángulo puede ser positivo, negativo o cero (*figura 1.2.5.*). Cuanto mas positivo sea menor será el rozamiento entre la viruta y la herramienta y producirá menores deformaciones que los ángulos negativos, estos últimos además le darán una mayor robustez a la herramienta.

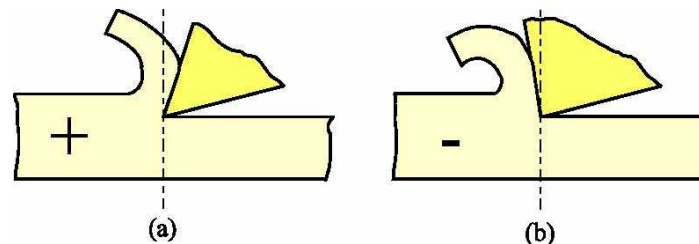


FIGURA 1.2.5. a) Angulo γ positivo; b) Angulo γ negativo [4].

Si γ grande:

- * Mayor penetración de la herramienta y buen corte. Mejor acabado superficial.
- * Mayor debilidad del filo de corte.

Si γ pequeño:

- * Favorece la resistencia de la herramienta.
- * La energía consumida y calentamiento de la herramienta aumentan.

En general el ángulo de desprendimiento mas adecuado será el mayor que la herramienta pueda soportar sin romperse, y estará condicionado por la resistencia del material del que este compuesta, el material a mecanizar y el avance.

Como mas delante se comentara, el modelo de la simulación estará definido con un ángulo de desprendimiento nulo (0°).



Angulo de incidencia (α):

Este es el ángulo formado por la superficie de incidencia de la herramienta y la superficie de la pieza que ya ha sido trabajada.

Si α pequeño:

El contacto con la pieza aumenta, produciéndose: un roce excesivo, un aumento de la temperatura y un desgaste más rápido de la herramienta.

Si α demasiado grande:

Se debilita el filo, no esta suficientemente apoyado para resistir las fuerzas de corte.

La elección del ángulo de incidencia correcto se hace en función del material de la pieza y de la herramienta. Cuanto mas duro sea el material a mecanizar menor ángulo de incidencia para resistir mejor las fuerzas de corte.

El ángulo del filo (β):

Queda definido por los ángulos que forman las superficies de incidencia y la superficie de desprendimiento.

Espesor de viruta no deformada (a) y deformada (a_d). Factor de recalcado (Cr):

El espesor del material antes de ser trabajado y de sufrir deformación alguna queda definido por el parámetro (a = avance), una vez deformado se define el espesor de la viruta (a_d).

Mediante el factor de recalcado (Cr), se relacionan ambos espesores (*figura 1.2.6.*):

$$c_r = \frac{a_d}{a} \geq 1 \quad (Ec\ 1.2.4.)$$



El ángulo de deslizamiento o cizalladura (ϕ):

Es el ángulo formado por el plano de corte o cizalladura y la superficie a mecanizar. Este es un plano teórico en el que se produce el deslizamiento entre los átomos del material, que da lugar a la deformación plástica localizada. Depende del material de la herramienta y de las condiciones de corte.

Un *pequeño ángulo de cizalladura* unido a un *ángulo de desprendimiento pequeño*, generan condiciones de corte con una *mayor deformación*, y por lo tanto mayor las posibilidades de que aparezca segmentación, mejorando así las condiciones de corte.

Existe una relación entre el ángulo de cizalladura (ϕ) y el factor de recalcado (C_r), que se extrae geométricamente de la (figura 1.2.6):

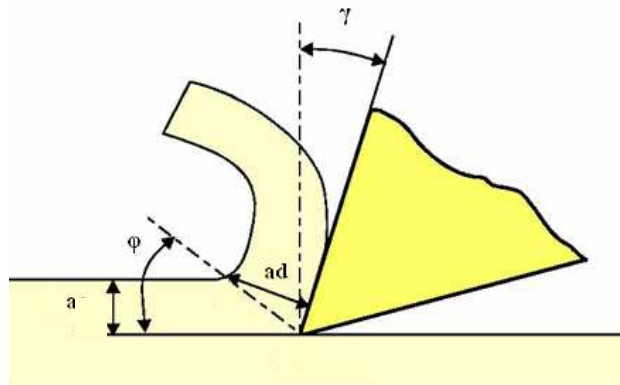


FIGURA 1.2.6. Ángulo de cizalladura ϕ y relación trigonométrica con los espesores a y a_d [4].

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\cos \gamma}{C_r - \operatorname{sen} \gamma} \rightarrow \phi \quad (\text{Ec 1.2.5.})$$

Con esta expresión se relaciona el ángulo de cizalladura ϕ con el factor de recalcado C_r y el ángulo de desprendimiento γ , datos que son conocidos, y por lo tanto permiten obtener el valor de ϕ .



Si se aumenta el espesor de la viruta antes del corte a , disminuye el factor de recalcado Cr y consecuentemente según las ecuaciones presentadas aumenta ϕ y disminuye la deformación ε .

El punto óptimo es que el factor de recalcado (Cr) tienda a la unidad, para minimizar el ángulo de cizalladura ϕ y así conseguir mayores deformaciones ε [5].

Otros factores influyentes:

- Si aumenta la tenacidad de la pieza \rightarrow aumenta Cr
- Si aumenta el ángulo de desprendimiento $\gamma \rightarrow$ aumenta Cr

Efectos del aumento del factor de recalcado Cr :

- Disminuye la velocidad salida de viruta (continuidad de la masa).
- Aumenta la presión de corte y la temperatura.

La velocidad de corte (v_c):

La velocidad de corte es un parámetro muy importante en el corte ortogonal. Su vector es perpendicular al filo de la herramienta y cuanto mayor sea el valor de su módulo, más se conseguirá:

- Reducir las fuerzas de corte.
- Limitar de la longitud de la herramienta.
- Aumentar la calidad de las superficies finales obtenidas.
- Aumento de la temperatura en el interfaz herramienta / viruta y zonas de corte.
- Desgaste prematuro de la herramienta.

Más adelante se verá la influencia de este parámetro en el proceso de corte.



El avance (a):

En el modelo usado para la simulación del material, el avance utilizado es constante en todo momento y para todas las simulaciones realizadas. Y además dará siempre el valor del espesor de la viruta antes de deformar.

El comportamiento del material:

Las propiedades mecánicas del material reflejan su reacción frente a la aplicación de esfuerzos externos. La resistencia mecánica mide la magnitud de la fuerza externa que es necesaria aplicar para vencer las fuerzas internas entre las partículas que forman el material.

Al someter al material a una fuerza externa, este se deformará normalmente en la dirección de la fuerza aplicada, llegando incluso hasta la rotura. Esta magnitud de deformación tiene una dependencia temporal que hace que sea función de la intensidad de la fuerza aplicada, el tiempo de actuación de la misma y de la velocidad con la que se aplique.

De acuerdo con esta visión del comportamiento de los materiales frente a la aplicación de fuerzas externas, se puede decir que la capacidad de deformación en las condiciones específicas del mecanizado, es otro parámetro importante relacionado con la formación de la viruta.

Destacar que por ejemplo en el mecanizado de alta velocidad se producen condiciones extremas de la deformación, la temperatura y la velocidad de deformación, lo que condicionará las fuerzas necesarias para el corte.

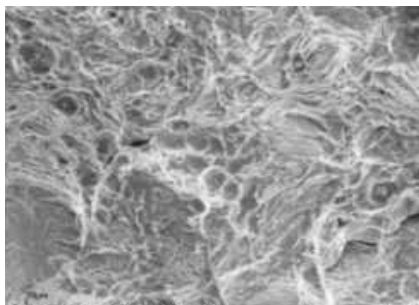


1.3. MECANISMO DE FORMACIÓN DE LA VIRUTA.

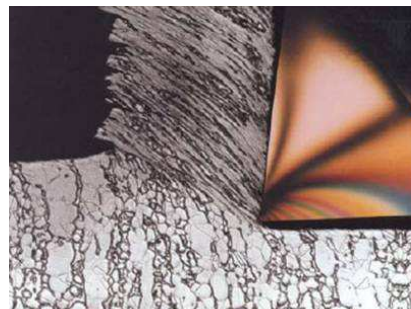
Se sabe que los materiales se rompen de muy diversas maneras, los más quebradizos se rompen en trozos grandes, mientras que los materiales dúctiles pueden sufrir un estiramiento antes de conseguir su rotura. La forma en que se produce la rotura de las uniones internas del material depende de varios factores como las propiedades del propio material, las propiedades del material de la herramienta de corte y de la velocidad con que se produce el corte, entre otras.

Los metales por ejemplo están formados por cristales poliédricos llamados *granos*, cuando estos granos son sometidos a un esfuerzo capaz de deformarlos se orientan en forma de planos, llamados fibras (*figura 1.3.1. a)b*)).

Si se aplica una fuerza a un metal, en estos planos de deslizamiento los átomos comienzan a deslizarse unos sobre otros, hasta que parte del material se separa. Este material empujado fuera de la superficie es la denominada **viruta** (*figura 1.3.1. b) y c*)).



a)



b)



c)

FIGURA 1.3.1. a) Ejemplo de estructura cristalina (Abnt 4130) [26]; b) Planos de deslizamiento en la viruta; c) Viruta generada en el corte de aluminio [22].



El arranque de viruta en máquinas herramienta, se realiza utilizando herramientas de corte y elementos de sujeción. En la *maquina herramienta* se colocan y sujetan las herramientas y las piezas a mecanizar. Las *herramientas de corte* deben cortar el material en forma viruta, por lo que es preciso que soporten las fuerzas producidas y que presenten elevada dureza y resistencia al desgaste. Los *elementos de sujeción* permiten sujetar la pieza y la herramienta a la máquina.

Estos procesos de corte están fuertemente ligados al comportamiento de los diferentes metales cuando se forma la viruta. La calidad del corte depende en gran medida de:

- Las *fuerzas de corte*. Afectan a la fuerza y potencia necesarias para llevar a cabo el proceso.
- La *temperatura alcanzada*. Afecta al proceso en si mismo ya que si es suficientemente elevada puede influir negativamente en los dos materiales en contacto: pieza y herramienta.

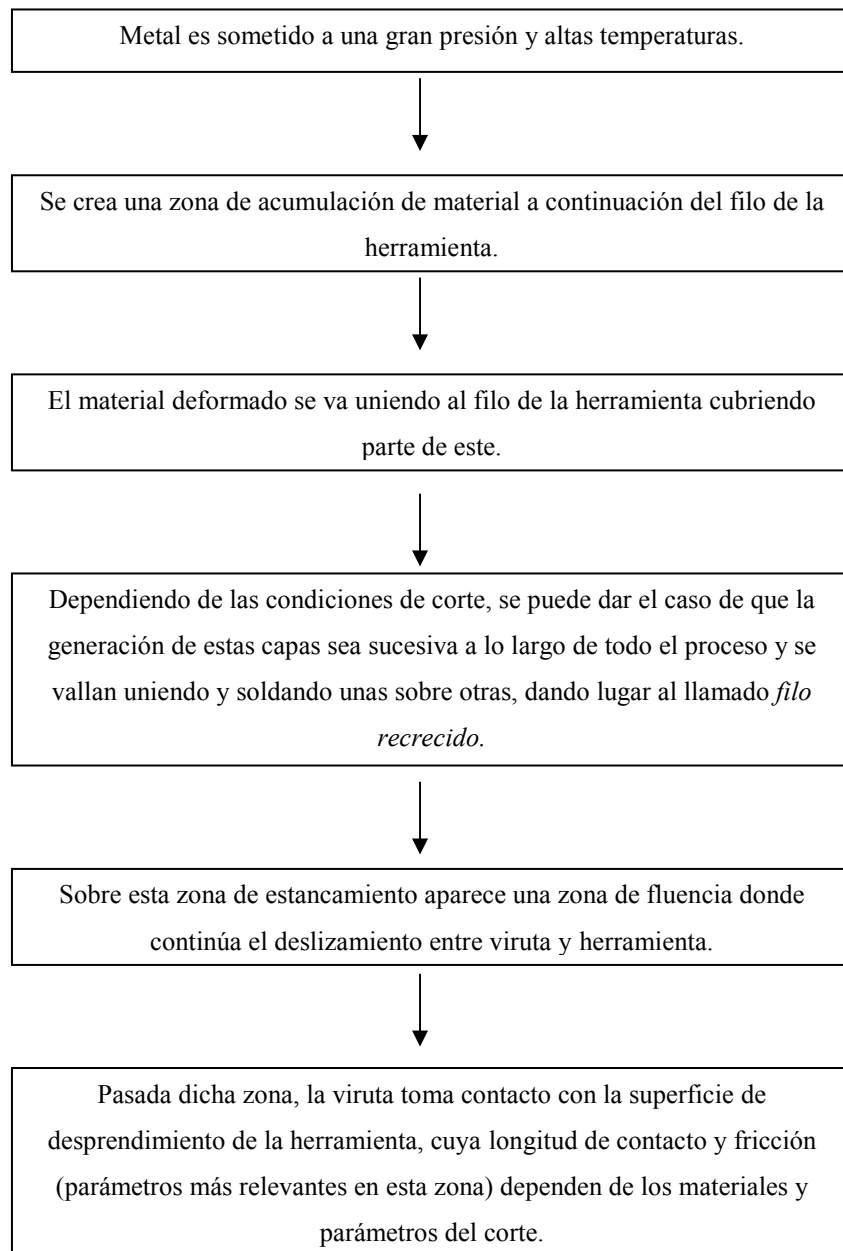
La importancia de un buen diseño en el filo de corte radica en la posibilidad de controlar la temperatura, las fuerzas y la formación de la viruta para unas condiciones determinadas de mecanizado.

La forma y el tipo de viruta generada varía considerablemente, según sea el material de la pieza y los parámetros de corte, se pueden encontrar diferentes morfologías, desde una viruta continua y suave, hasta un flujo continuo de elementos en forma de laminas que se desprenden por cizallamiento (este fenómeno es el mayor grado de segmentación al que se puede llegar).

Destacar que cuanto mayor segmentación se consiga más sencilla será la eliminación o evacuación de la viruta. En este proyecto uno de los aspectos que se tratan, será, ver como varía la morfología de la viruta, variando parámetros de corte y parámetros sobre el modelo del material.



Se ha demostrado que la formación de la viruta, su flujo, forma y movimiento, depende del material que se mecanicé y de los parámetros del corte. A pesar de esto y tras diversas investigaciones se ha llegado a definir una secuencia de formación:





Las energías de deformación y de fricción en los procesos de corte se disipan en forma de calor y este calor aumenta la temperatura en las zonas de corte.

La energía absorbida en el proceso de corte se utiliza en (figura 1.3.2.):

- *Deformación plástica*: no se devuelve (romper enlaces atómicos con desprendimiento de calor).
- *Pérdidas por rozamiento* (la fricción entre material y herramienta disipa calor).

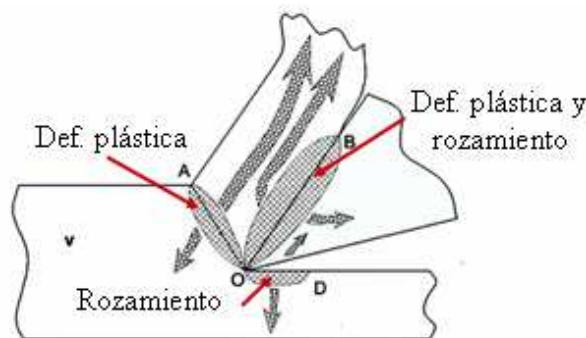


FIGURA 1.3.2. Localización de la energía del corte en forma de deformación [21].

Las mayores temperaturas se alcanzan con un material de la pieza muy duro, a una alta velocidad de corte y un avance o profundidad de pasada grande.

Si el material de la pieza tiene un alto calor específico y una alta conductividad térmica las temperaturas no serán tan elevadas.

Existen localizaciones o zonas definidas teórica y experimentalmente (figura 1.3.3.) en función de la generación de calor o aumento de la temperatura [5]:

- Un 80% del calor se generara en la *zona primaria (1)*.
- Un 18%, debido a la fricción (μ) entre pieza y herramienta, en la *zona secundaria (2)*.
- Un 2% del calor generado se localiza en la superficie de contacto entre el filo de la herramienta y la superficie mecanizada, *zona terciaria (3)*.

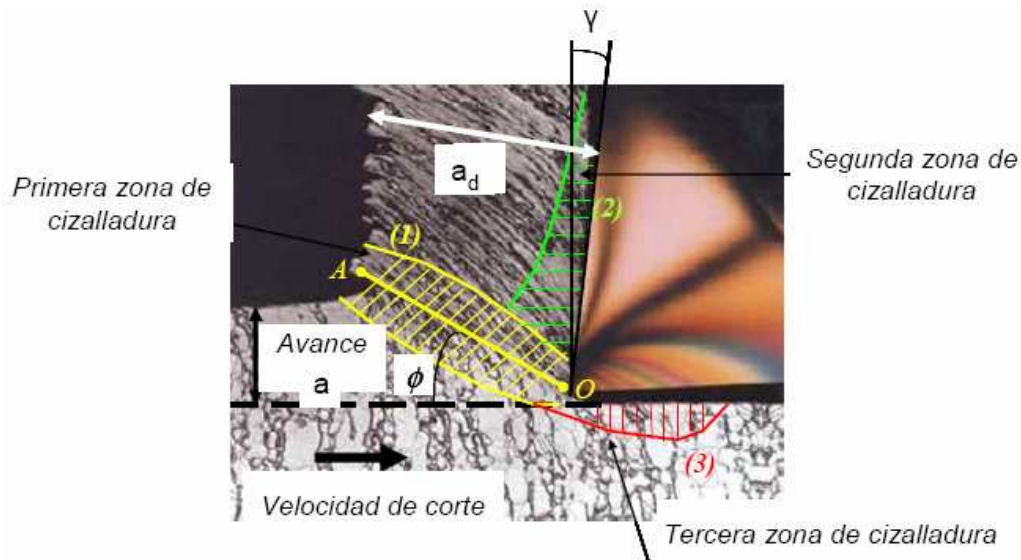


FIGURA 1.3.3. Zonas principales de generación de calor.

Zona primaria (1): Es la zona principal de cizalladura y donde la deformación plástica va a tener especial importancia. Aquí el material es sometido a niveles altos de tensión y temperatura debido al cambio brusco de dirección del flujo de materia en un tiempo muy corto.

Esta zona va a ser el principal objeto de estudio, sobre las simulaciones realizadas en este trabajo, con el fin de conseguir definir el ancho de la banda de cizalladura y el valor de las deformaciones que se producen en ella.

Zona secundaria (2): Aquí se produce el contacto directo y más brusco entre la herramienta y la viruta generada. A lo largo de toda la longitud de contacto, el fenómeno de *fricción* (μ) y la *presión* entre ambas superficies, va a tomar especial importancia, ya que producirán un incremento de la temperatura que puede dar lugar a la fusión del material mecanizado, sobre todo en la zona de la punta de la herramienta generando un *filo recrecido* (figura 1.3.4.b)).

Este *borde acumulado* se observa con frecuencia en la práctica, pero no siempre ya que *depende de los parámetros de corte*. Es uno de los factores que afecta de manera más adversa al acabado superficial. De hecho un borde acumulado varía la geometría de la herramienta (figura 1.3.4. a)).

Debido a este fenómeno, interesa disminuir todo lo posible el valor de la fricción (μ) para evitar que se dé durante el corte. Posibles soluciones serían:

- Aumentar la velocidad de corte (*figura 1.3.5*).
- Lubricar para que disminuya temperatura y rozamiento.
- Usar materiales adecuados en las herramientas y con buenos acabados.
- Aumentar el ángulo de desprendimiento de la herramienta.

Zona terciaria (3): La zona de contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo, en este caso con la superficie mecanizada. Es muy difícil cuantificar las presiones y temperaturas que prevalecen en esta zona. Pero, se ha demostrado que su valor es significativamente menor que en la zona secundaria.

Es importante destacar que la calidad de la superficie de la pieza acabada está fuertemente influenciada por el contacto en esta área.

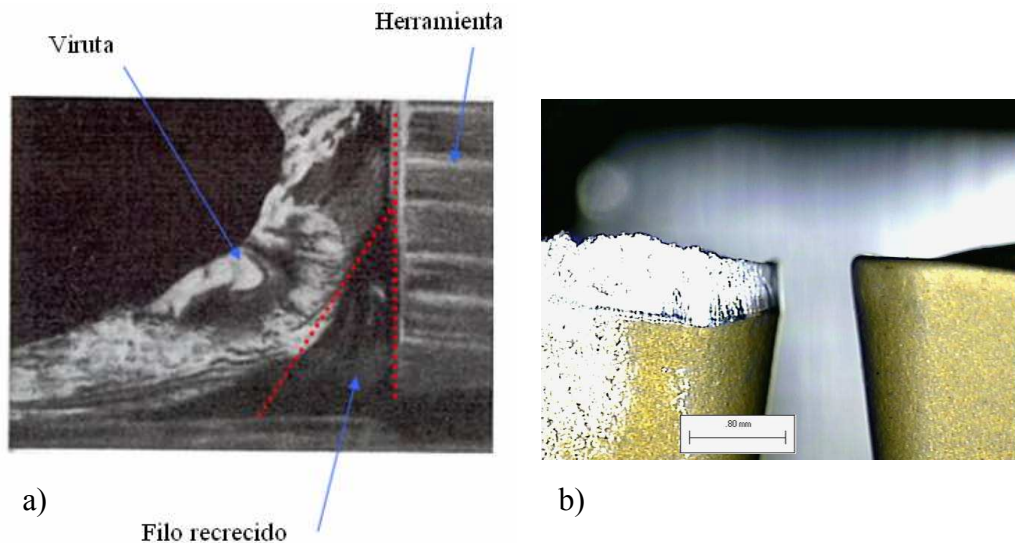


FIGURA 1.3.4. a) Variación de la geometría de la herramienta; b) Filo recrecido.

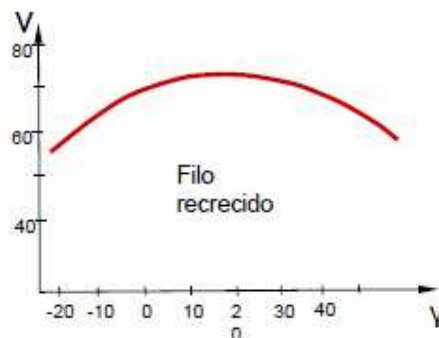


FIGURA 1.3.5. Influencia de la velocidad de corte en el filo recrecido [22].



1.4. DINAMICA Y CINEMATICA EN EL CORTE ORTOGONAL.

Dinámica del corte ortogonal:

La determinación de las fuerzas de corte en el mecanizado permite conocer, no sólo las sollicitaciones dinámicas a las que se ve sometida la herramienta o la pieza, sino también el valor de la potencia requerida para poder efectuar el proceso.

La mayor parte de dicha potencia se consume en la eliminación del material de la pieza (deformación), de ahí que la componente de la fuerza que reviste una mayor importancia desde este punto de vista, es aquella que tiene la misma dirección que la velocidad de corte. A esta componente es a la que normalmente se denomina fuerza de corte (F_c).

A pesar de que la fuerza de corte (F_c) es la de mayor influencia en el proceso, existe otra perpendicular a ella denominada fuerza tangencial o normal (N_c), la cual en el modelo que se va a estudiar coincide con la fuerza de avance ($F_a = N_c$).

Estos dos vectores dan lugar a una resultante de fuerzas F (*figura 1.4.1.*), que no actúa exactamente en el filo, sino que su zona de aplicación depende del ángulo de desprendimiento (γ), cuanto mas pequeño sea este, mas alejada estará del filo.

La fuerza resultante F se puede descomponer según tres sistemas de fuerzas, referidos a diferentes direcciones (*figura 1.4.1.*):



- Dirección del movimiento principal de corte y su normal (avance): (F_c) y ($N_c = F_a$).
- Dirección del plano de cizalladura y su normal: (F_d) y (N_d).
- Dirección de la superficie de desprendimiento de la herramienta y su normal: (F_r) y (N_r).

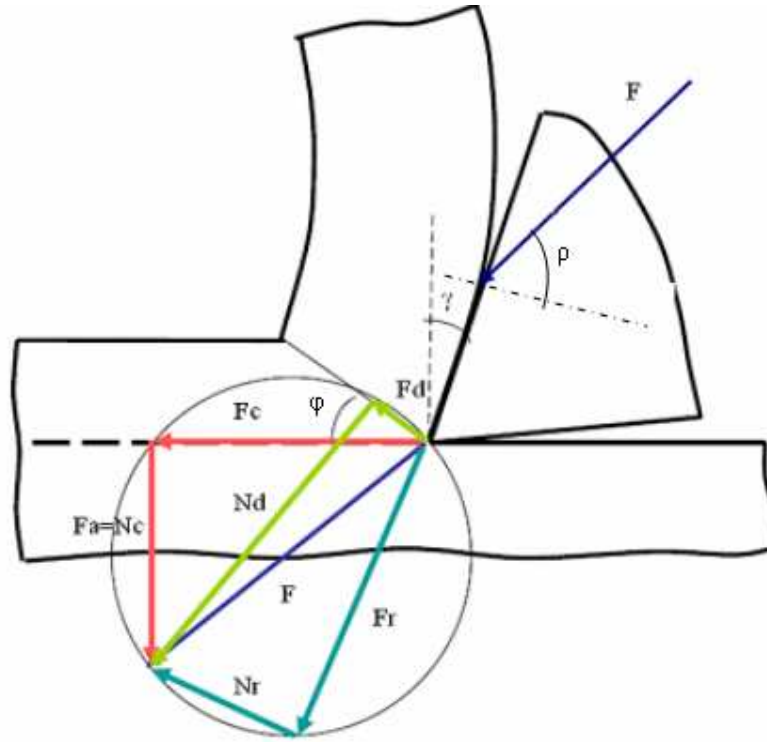


FIGURA 1.4.1. Resultante de fuerzas F y descomposición vectorial de la misma [22].

La suma vectorial, sería la siguiente:

$$\vec{F} = \vec{F}_c + \vec{N}_c = F_r + \vec{N}_r = F_d + \vec{N}_d \quad (Ec.1.4.1.)$$

Donde:

F_c = Fuerza de corte, que nos permitirá conocer la potencia necesaria.

F_d = Fuerza de deslizamiento, relacionada con las tensiones cortantes en el plano donde se produce la viruta.

F_r = Fuerza de rozamiento entre la viruta y la herramienta.

ρ = Angulo de rozamiento.



Las relaciones trigonométricas que se deducen de la *figura 1.4.1.*, llevan a las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} F_c &= F \cos(\rho - \gamma) \\ N_c &= F_a = F \sin(\rho - \gamma) \end{aligned} \quad (\text{Ec's; 1.4.2., 1.4.3.})$$

$$\begin{aligned} F_d &= F \cos(\phi + \rho - \gamma) \\ N_d &= F \sin(\phi + \rho - \gamma) \end{aligned} \quad (\text{Ec's; 1.4.4., 1.4.5.})$$

$$\begin{aligned} F_r &= F \sin \rho \\ N_r &= F \cos \rho \end{aligned} \quad (\text{Ec's; 1.4.6., 1.4.7.})$$

De las ecuaciones (1.4.6. y 1.4.7.) se calcula el coeficiente de fricción μ_{roz} que aparece entre la viruta y la superficie de desprendimiento, este suele ser constante en toda la longitud de contacto.

En un proceso de mecanizado convencional de metales, los coeficientes de fricción medidos suelen tener valores elevados ($0.5 < \mu < 2$) en comparación con los valores medidos en un contacto convencional del mismo material.

$$\mu_{roz} = \tan \rho = \frac{F_r}{N_r} \quad (\text{Ec. 1.4.8.})$$

Sabiendo que la fuerza de deslizamiento (*figura 1.4.2.*) es el producto de la resistencia a cortante del material (τ_s) por un área, que será la sección de la viruta relacionada con la sección de la misma sin deformar (S , *ec. 1.2.3.*).

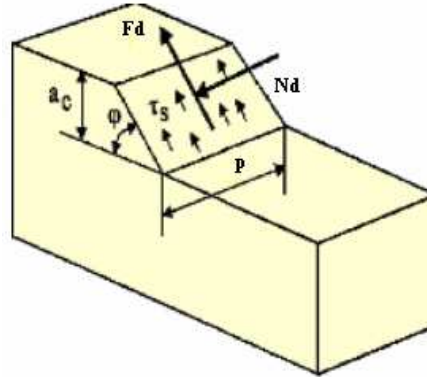


FIGURA 1.4.2. Fuerzas en el plano de deslizamiento [4].

$$S_d = \frac{S}{\text{sen}\varphi} = \frac{a_c p}{\text{sen}\varphi} \quad (\text{Ec. 1.4.9.})$$

$$F_d = \tau_s S_d = \tau_s \frac{S}{\text{sen}\varphi} = F \cos(\varphi + \rho - \gamma) \quad (\text{Ec. 1.4.10.})$$

De (Ec. 1.4.10.), se obtiene

$$F = S \tau_s \frac{1}{\text{sen}\varphi \cdot \cos(\varphi + \rho - \gamma)} \quad (\text{Ec. 1.4.11.})$$

Esta expresión de (F), se sustituye en la de la fuerza de corte (Ec. 1.4.2), quedando:

$$F_c = \tau_s \frac{S}{\text{sen}\varphi} \frac{\cos(\rho - \gamma)}{\cos(\varphi + \rho - \gamma)} \quad (\text{Ec. 1.4.12.})$$

El valor del ángulo de rozamiento (ρ), es desconocido, y por ello existen diferentes teorías de corte que lo definen. Destacar, la *Teoría de Merchant* [3], que dice que el plano de deslizamiento o cizalladura se orienta de forma que la energía consumida sea mínima, es decir minimizando la (F_c).



Para ello se maximiza el denominador de su expresión y se llega a un valor óptimo de (ρ), con el que se consigue definir la (F_c) de una forma más sencilla:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} (\sin \varphi \cos(\varphi + \rho - \gamma)) = 0 \quad (\text{Ec. 1.4.13.})$$

$$\rho = \frac{\pi}{2} + \gamma - 2\varphi$$

$$F_c = 2\tau_s \frac{S}{\tan \varphi} \quad (\text{Ec. 1.4.14.})$$

Donde φ se conoce de (Ec 1.2.5.).

Conocida la fuerza de corte, se sacan parámetros fundamentales para la elección de la maquina-herramienta como la *potencia* (Ec.1.4.16), *presión* y *presión específica* (Ec. 1.4.15.) de corte.

$$p_c = k_c = \frac{F_c}{S} \quad (\text{Ec. 1.4.15.})$$

Cuando $S = 1\text{mm}^2$, se conoce como presión específica k_s

$$P_c = F_c v_c \quad (\text{Ec. 1.4.16.})$$

Cinemática del corte ortogonal:

Además de la *velocidad de corte* (v_c), estudiando la cinemática del mecanizado se encuentran otras dos velocidades características del proceso:

- *Velocidad de deformación* o de cizallamiento (v_s); la velocidad relativa respecto a la pieza.
- Velocidad de la viruta respecto a la herramienta o *velocidad de deslizamiento* (v_v) de la viruta sobre la superficie de la herramienta.

Con estas tres velocidades, se puede definir sobre un plano, el triángulo de velocidades que aparecen en el corte (*figura 1.4.1.*).

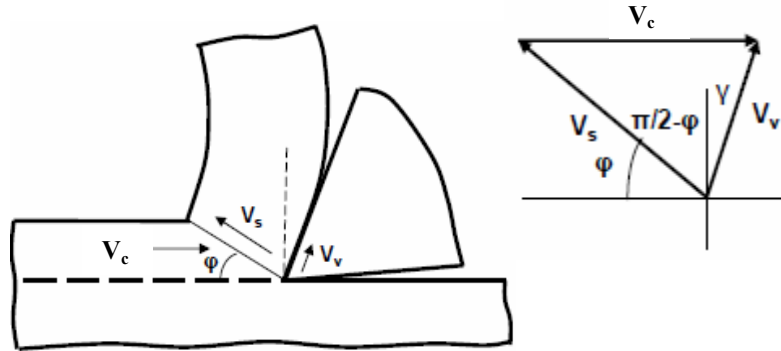


FIGURA 1.4.3. Triángulo de velocidades, en el corte [4].

Geométricamente y conocidos los ángulos de cizalladura (ϕ) y de desprendimiento (γ) junto con la velocidad de corte (v_c), se construyen las expresiones que definen las velocidades anteriormente descritas.

$$v_v = v_c \frac{\text{sen}\phi}{\text{sen}(\gamma + \frac{\pi}{2} + \phi)} \quad (\text{Ec. 1.4.17.})$$

$$v_s = v_c \frac{\text{sen}(\frac{\pi}{2} - \gamma)}{\text{sen}(\gamma + \frac{\pi}{2} - \phi)} \quad (\text{Ec. 1.4.18.})$$



1.5. EFECTOS DE LA VELOCIDAD DE CORTE.

Mediante otros estudios y ensayos realizados en otros materiales [6], se intentara dar una visión algo mas concreta de cómo afecta la variación del parámetro de la velocidad de corte en, la morfología y tipos de viruta desprendida, y en las fuerzas necesarias para el corte.

Mas adelante con ayuda de los resultados obtenidos en las simulaciones, se vera si esa influencia sigue un patrón, y afecta de forma similar en el proceso de corte del material sometido a estudio.

1.5.1. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE CORTE SOBRE LA MORFOLOGIA DE LA VIRUTA GENERADA [5] [6] [19].

Al observar la formación real de virutas bajo distintas condiciones de corte en un metal, se ven desviaciones apreciables del modelo ideal. Se describirán los siguientes tipos de viruta: continua (*figura 1.5.1.1.*), segmentada (*figura 1.5.1.2.*) y discontinua (*figura 1.5.1.3.*).

Una viruta posee dos superficies, una en contacto con la cara de la herramienta (superficie de desprendimiento) y otra la de la superficie original de la pieza. La cara de la viruta que se desliza sobre la herramienta suele ser brillante, y ello se debe al rozamiento producido sobre la longitud de contacto. La otra superficie de la viruta no se pone en contacto con nada, y posee un aspecto rasgado y áspero, que se debe al propio proceso de corte.

Para describir la generación de virutas en el proceso de torneado exterior de un material, se han de estudiar gran variedad de casos. La forma y geometría de la viruta esta vinculada a la forma de la herramienta y a las condiciones de corte. Esta información es importante para juzgar la maquinabilidad del material.

Una rotura corta de la viruta, discontinuidad o segmentación de la misma es óptima en el proceso de corte (sobre todo si es CNC), ya que no afectara a la superficie mecanizada ni a los elementos que la rodean.

Con una velocidad de corte convencional, la temperatura de la viruta sin deformar es menor y la que se genera lo hace por cizalladura en la zona primaria de corte. Esta zona de la viruta esta muy deformada, y se produce un *endurecimiento del material por deformación* que dificulta su rotura, lo que da lugar a un corte continuo o a una viruta continua.

Una velocidad de corte mayor, podrá dar lugar a una viruta segmentada. El proceso de corte ya no es estable, ya que el *endurecimiento por deformación del material*, será compensado por el *reblandecimiento térmico* del mismo. La viruta será definida por una rápida pero baja compresión del material, que ira seguida de un corte rápido en forma de lámina.

Un aumento de la temperatura en el corte, producido por unas velocidades mayores, da lugar a un ablandamiento del material y con ello una menor resistencia a la deformación lo que facilita la rotura de la viruta.

Viruta continúa:

Las virutas continuas se suelen formar con materiales dúctiles a grandes velocidades de corte y/o grandes ángulos de desprendimiento, debido a la fricción también pueden desarrollar zonas secundarias de corte.

Aunque en general producen buen acabado superficial, las virutas continuas no siempre son deseables, en especial en las máquinas-herramientas controladas por control numérico (CNC) que son habituales hoy en día. Tienden a enredarse en el portaherramientas, los soportes y la pieza, así como en los sistemas de eliminación de viruta, y se debe parar la operación para apartarlas.

Este problema se puede solucionar con los rompe-virutas o bien cambiando los parámetros de maquinado, como la velocidad de corte, el avance o la profundidad, entre otros.

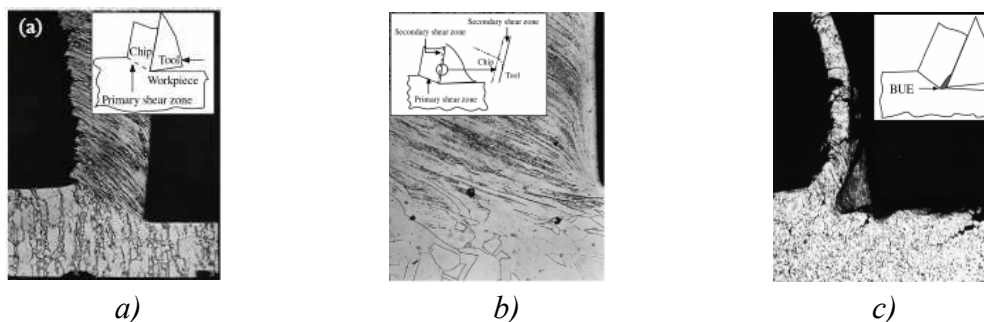


FIGURA 1.5.1.1. Viruta continua: a) Viruta continua con zona de corte primaria estrecha, b) Detalle del contacto viruta continua-herramienta, c) Viruta continua con generación de filo recrecido [20].



Viruta segmentada:

Las virutas segmentadas (también denominadas no homogéneas) son virutas con zonas de baja y alta deformación cortante.

Los metales con baja conductividad térmica y con una resistencia que disminuye rápidamente con el aumento de la temperatura, “como el titanio”, muestran este comportamiento. Las virutas tienen un aspecto de diente de sierra y están compuestas de elementos parcialmente unidos y ligados entre sí.

La herramienta ha de tener la rigidez adecuada, ya que las fuerzas de corte varían continuamente apareciendo vibraciones, y daría lugar a una baja calidad superficial y mala precisión dimensional.

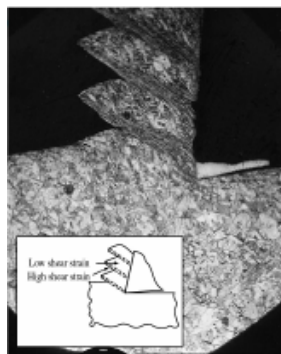


FIGURA 1.5.1.2. Viruta segmentada [20].

Viruta discontinua:

Las virutas discontinuas consisten en segmentos que se desprenden totalmente del material de la pieza. Este fenómeno se suele dar bajo las siguientes condiciones:

- Materiales frágiles de la pieza, porque no tienen la capacidad para absorber las grandes deformaciones constantes que se presentan en el corte.
- Materiales de la pieza que contienen inclusiones e impurezas duras.
- Velocidades de corte muy bajas o muy altas con un avance grande.
- Grandes profundidades de corte.
- Angulo de desprendimiento (γ) bajo.

Debido a la naturaleza de la formación de este tipo de virutas, las fuerzas varían de forma cíclica, apareciendo con una cierta frecuencia picos de esfuerzo durante el corte. Por este motivo y al igual que en el caso de la segmentación, es importante que tanto la herramienta, como todos los elementos que la rodean tengan buena rigidez.

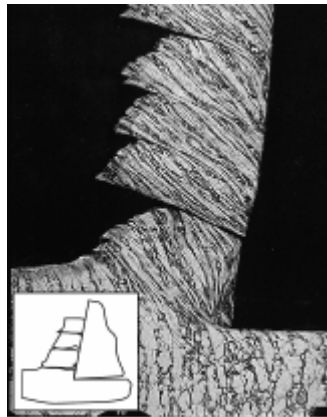


FIGURA 1.5.1.3. Viruta discontinua [20].

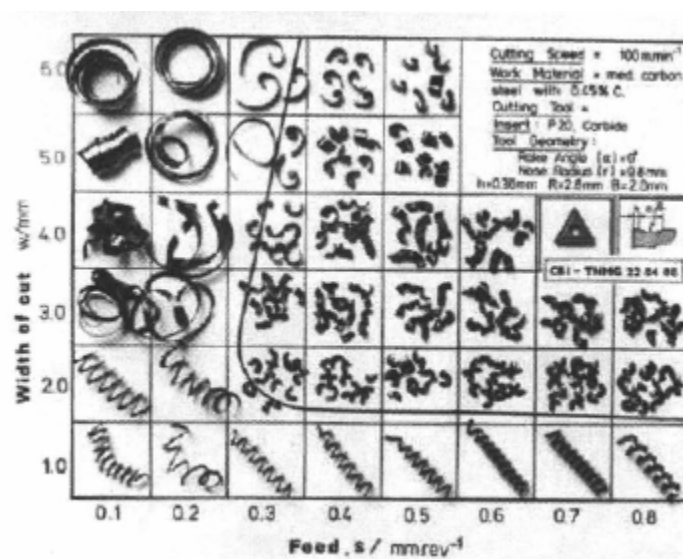


FIGURA 1.5.1.4. Morfología de la viruta en función de la profundidad (p = width) y del avance del corte (a = feed) [19].

EJEMPLO DE OTROS ESTUDIOS [6]: *Acero (AISI1045), Aluminio (AA7075), Titanio (TiAl6V4).*

Aluminio (AA7075)

Para este aluminio forjado, a una velocidad de corte baja, nos muestra una viruta continua y enredada. En cuanto a la profundidad de corte y el avance no suponen una influencia significativa en la formación de la viruta sobre todo para velocidades bajas.

La forma de esta viruta continua y enredada no es deseada y como se observa en la (figura 1.5.1.5.) es producto de las velocidades de corte bajas (≈ 100 - 1000 m/min), mientras que las condiciones de corte que llevan a una rotura de la viruta (segmentación o discontinuidad) son las de velocidades de corte mas altas (≈ 2000 - 8000 m/min).

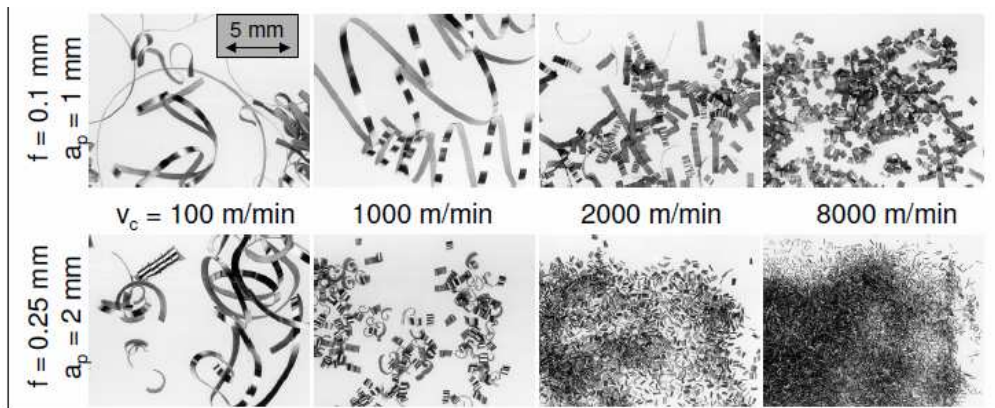


FIGURA 1.5.1.5. Morfología de la viruta del AA7075 en función de la V_c el avance ($a=f$) y la profundidad ($p=a_p$) [6].

Acero (AISI1045)

Para este acero en concreto, se han llevado a cabo diferentes cortes para un valor del avance constante, unas profundidades de corte de $0.1 - 0.25$ mm y diferentes velocidades de corte (figura 1.5.1.5.).

Tras los ensayos se ha llegado a la conclusión de que para velocidades y profundidades de corte pequeñas la morfología de la viruta que se genera es de forma enmarañada y por lo tanto no es optima para el corte, sin embargo, para profundidades mayores y mismas velocidades si que se observa rotura de la viruta.

Para la velocidad mayor (6000 m/min) la forma de la viruta es semejante para ambas profundidades.

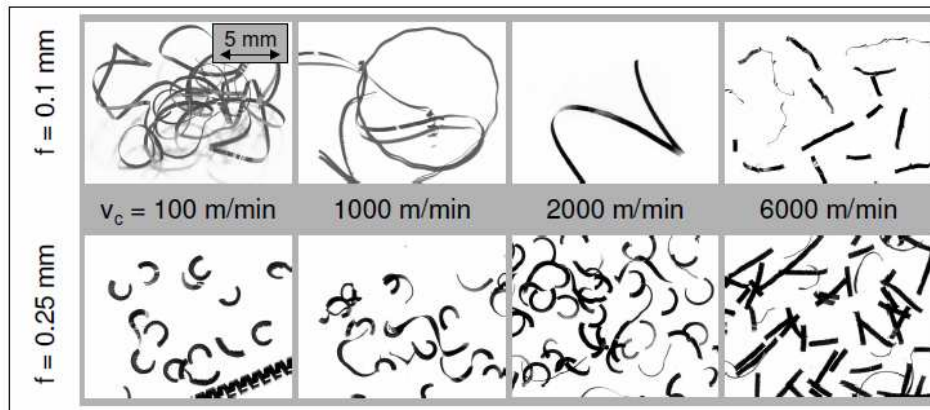


FIGURA 1.5.1.6. Morfología de la viruta del AISI1045 en función de la V_c y el avance ($a=f$) [6].

Titanio (TiAl6V4)

Debido a un mayor desgaste de la herramienta, las velocidades de corte en el proceso de mecanizado de este material son de un orden de magnitud menor que en el acero y aluminio (figura 1.5.1.6.).

Por el mismo motivo, los incrementos de las velocidades para los diferentes ensayos son más pequeños y como consecuencia no se encuentran grandes diferencias entre las formas de la viruta, como ocurría en el acero y el aluminio.

Tanto para una profundidad de corte baja como para una alta la viruta sigue teniendo una morfología alargada hasta por lo menos una $V_c = 300$ m/min, lo que indica que un aumento de la velocidad de corte no influye en la aparición de segmentación o rotura, sin embargo el rizado de la viruta si es menor a velocidades altas.

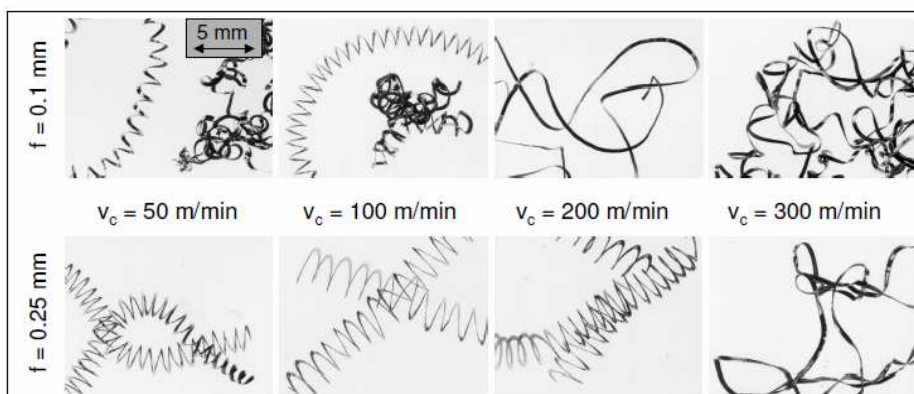


FIGURA 1.5.1.7. Morfología de la viruta del TiAl6V4 en función de la V_c y el avance ($a=f$) [6].

Resumiendo, decir que una velocidad de corte alta, mejora la rotura de la viruta en la aleación de *Aluminio*, y, que un cambio del avance y la profundidad de corte llevan a la disminución de la velocidad para conseguir dicha rotura.

Para el *Acero*, el aumento de la velocidad da lugar a una rotura de la viruta, incluso aumentando el avance también se consigue para velocidades mas bajas.

En el *Titanio*, las velocidades de corte han de ser más pequeñas debido al tipo de herramienta utilizada. Según se va incrementando la velocidad se va pasando de una viruta en forma de sacacorchos a una viruta simplemente enredada, esto es una desventaja ya que esta morfología hace que la viruta pueda llegar a atarse en la pieza de trabajo y dañar la superficie mecanizada.

Se ha estudiado y observado que la velocidad de corte tiene influencia en la formación, espesor, radio y longitud de contacto con la herramienta de la viruta (*figuras 1.5.1.8, 9, 10*), ¿Pero?, ¿Cómo afecta la velocidad de corte sobre las fuerzas de corte?

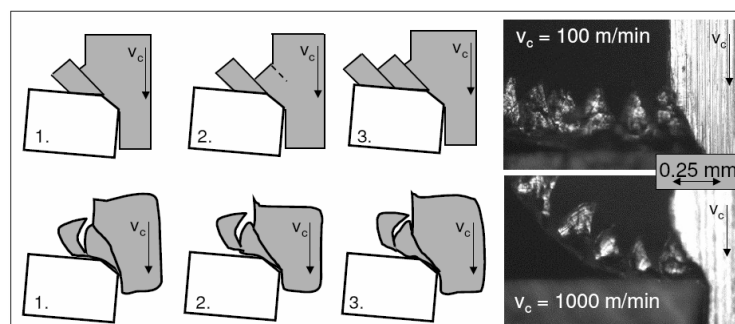


FIGURA 1.5.1.8. Influencia en la longitud de contacto de la velocidad de corte [6].

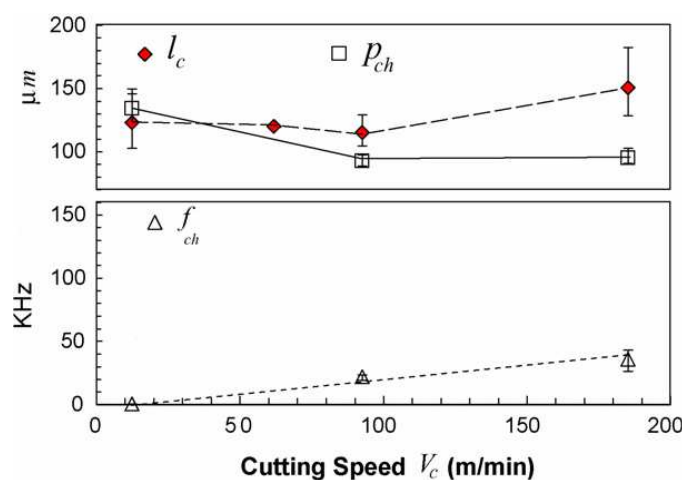


FIGURA 1.5.1.9. Longitud de contacto y frecuencia de aparición de la banda de cizalladura en función de la V_c para corte ortogonal sobre 100Cr6 acero [10].



1.5.2. EFECTO DE LA VELOCIDAD DE CORTE SOBRE LAS FUERZAS DE CORTE [6].

Mediante varias mediciones sobre las fuerzas resultantes en función de las velocidades de corte, los resultados dan lugar diversas conclusiones.

Las fuerzas de corte disminuyen con el incremento de la velocidad de corte (*figura 1.5.2.1.*), a su vez en este rango de velocidades en aumento, la formación de la viruta varia en mayor o menor medida de continua a segmentada. Sin embargo, si se observan los resultados, la variación de la fuerza de corte no tiene demasiada influencia en ese cambio de morfología, sino, mas la velocidad de corte y otros parámetros como la geometría de la herramienta o las propiedades del material mecanizado.

Por lo tanto se puede decir que los mecanismos de corte que llevan a decrecer las fuerzas resultantes, son similares a los que varían la morfología de la viruta de continua a segmentada o discontinua.

Toda la energía que se consume en el proceso de corte se disipa en forma de calor. Ya se ha comentado que existen tres localizaciones o focos de concentración de esta energía, de entre los cuales la *interfase viruta-herramienta (zona 2ª)* y la correspondiente a la *zona de cizalladura primaria (zona 1ª)* son las que van a influir en las resultantes de las *fuerzas de avance* y *fuerzas de corte* respectivamente.

Cuando se aumenta la velocidad de corte, el aumento de la temperatura en estas zonas es notable. En el ancho de la banda de cizalladura, el material se ablanda según su *sensibilidad al incremento de la temperatura*, y con ello el esfuerzo necesario para romper ese material es menor, con lo que la *fuerza de corte* que se tiene que aplicar con la herramienta también será menor.

Por otro lado el aumento de la temperatura en la zona secundaria (*interfase herramienta-viruta*), da lugar a condiciones de fricción diferentes, es decir, disminuye la fricción y con ello la resistencia al deslizamiento entre superficies, gracias a esto las *fuerzas de avance* necesarias también se hacen más pequeñas.



A lo largo de las explicaciones de cómo influye la velocidad de corte sobre la morfología y las fuerzas de corte, han tomado especial relevancia conceptos como el *endurecimiento por deformación* y la *sensibilidad al aumento de la temperatura*, a estos hay que unirles *la sensibilidad a la velocidad de deformación del material*.

Estos tres conceptos, se encuentran implementados en forma de parámetros, dentro de la ecuación que rige el comportamiento del material (INCONEL 718) a analizar en este trabajo, y que se basa en la ley de *Johnson Cook*.

Estos parámetros junto con la velocidad de corte forman el conjunto de *variables independientes* a tratar mediante el *MEF* en el presente proyecto.

Se verá la influencia del aumento de la velocidad de corte sobre el conjunto de *variables dependientes* como son; las fuerzas resultantes, la morfología de la viruta, la longitud de contacto viruta-herramienta y el ancho, frecuencias de aparición y deformaciones máximas obtenidas de la banda primaria de cizalladura. Seguidamente y con un rango de velocidades más pequeño, se intentará analizar la influencia de los parámetros de *Johnson Cook* anteriormente descritos.



2. INTRODUCCION AL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF); CARACTERISTICAS DEL MODELO, ECUACION CONSTITUTIVA DE JOHNSON COOK (MATERIAL).

El análisis del comportamiento de un material en un proceso de torneado, sometido a cargas dinámicas, puede llevarse a cabo por métodos empíricos, analíticos o numéricos. Los *métodos empíricos* se basan en la realización de pruebas experimentales reales, que proporcionan una información escasa del fenómeno y que generalmente son costosas en tiempo y dinero. Los *modelos analíticos* utilizan expresiones simplificadas, de las fuerzas que actúan sobre el sólido durante el proceso y así mismo emplean criterios de rotura simples de los materiales para deducir expresiones sencillas del comportamiento del mismo.

Los *métodos numéricos* se basan en la utilización de *programas de simulación*, basados en el *método de los elementos finitos*. En este caso se discretiza el problema tanto en el espacio como en el tiempo y se simula el proceso utilizando potentes ordenadores. La capacidad predictiva de estos métodos implica disponer de modelos fiables del comportamiento de los materiales involucrados. Un modelo completo requiere determinar la ecuación constitutiva que relaciona las tensiones y deformaciones en función de la velocidad de deformación, de la temperatura y finalmente el criterio de rotura del material.

El *método numérico* de los Elementos Finitos utilizado en este proyecto mediante el software ABAQUS, realiza una discretización del problema continuo.

El sólido, es modelado, dividiendo su forma continua original, en un número finito de partes o *Elementos*. A su vez estos elementos poseen en su contorno los denominados *Nodos* que unen cada elemento con sus adyacentes. Este proceso es lo que se conoce como *Mallado* de la pieza, y con él, se reduce el problema a un número finito de grados de libertad.

Una vez generado el mallado inicial, sobre este, se impondrán las diferentes condiciones de contorno del proceso e incluso se podrá redefinir el mallado inicial (una malla más fina) en zonas localizadas de interés con el fin de obtener resultados mucho más precisos, pero a su vez más complicados de resolver.



A lo largo de la simulación, el MEF va tomando valores de los desplazamientos que sufre cada nodo ante la aplicación de determinadas fuerzas, con estos desplazamientos y resolviendo las ecuaciones pertinentes se consiguen conocer las deformaciones de cada uno de los elementos, con estas y aplicando la ecuación constitutiva propia del material, tenemos como solución las tensiones a las que se ve sometido el sólido.

Los métodos numéricos proporcionan una gran cantidad de información del proceso (historias de tensión, deformación, temperatura, mapas de velocidades) y son mucho menos costosos que los procesos reales. Por todo ello, y teniendo en cuenta los grandes avances en capacidad y rapidez de cálculo experimentados por los ordenadores en los últimos años, la *simulación numérica* se ha convertido en una herramienta casi imprescindible para el análisis del comportamiento de elementos estructurales sometidos a cargas.

2.1. CARACTERISTICAS BASICAS DEL MODELO.

En la modelización se ha empleado un algoritmo explícito para problemas termo-mecánicamente acoplados proporcionado por ABAQUS/Explicit. Se consideran dos elementos fundamentales: la pieza a mecanizar y la herramienta de corte. Ésta última se supone rígida, siendo el material un metal duro. En la pieza inicial se define una interfase que separa la viruta y la pieza mecanizada (*figura 2.1.1.*). La eliminación de elementos que fallan da lugar a la formación de la viruta.

Para la evaluación del proceso de corte por torno a alta velocidad (cilindrado) del material, se ha creado un modelo inicial. Toda la información del modelo queda recogida en los archivos .INP que se cargan en ABAQUS para lanzar las simulaciones. Dentro de estos .INP se definen parámetros del modelo como: nodos, elementos, mallado, propiedades de los elementos, definición del material, ecuación constitutiva del material, geometría del modelo, parámetros de corte, tiempos de corte, historial de datos de salida, etc.

Destacar que la elaboración y diseño del modelo, no forma parte del contenido de este proyecto ya que conlleva un largo y minucioso trabajo, por ello ha sido facilitado de antemano. A pesar de esto, es de interés destacar ciertos contenidos básicos del mismo, cuya variación ha dado lugar a los distintos .INP.

a) Mallado del modelo; tipo de malla, tamaño y zonas redefinidas.

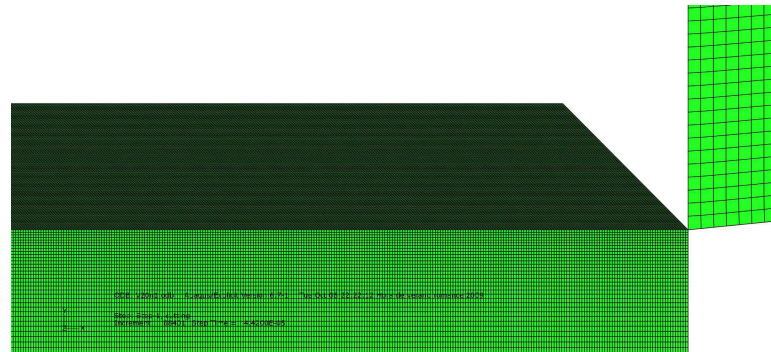


FIGURA 2.1.1. Mallado de los elementos del proceso real.

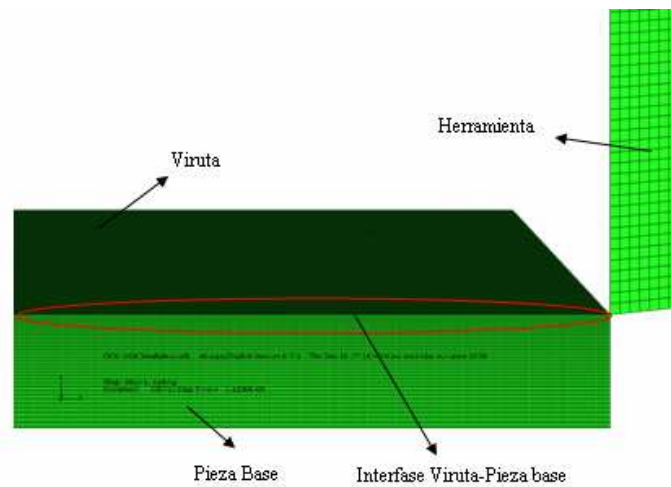


FIGURA 2.1.2. Partes que conforman el modelo.

Tipo de elemento utilizado para el mallado es CPE4RT (figura 2.1.1.):

C: Cuadrado.

PE: Supone una deformación plana.

4: Cada elemento tiene cuatro nodos.

R: Tiene una interpolación en el centro del elemento.

T: Utiliza la temperatura como variable.

Tamaño: Ultra Fina = $2 \times 1 \mu\text{m}$

El tamaño de la malla en la *viruta* y la interfase *viruta-pieza/base* se ha hecho mas pequeño con el fin de que la información recogida de sus nodos sea mayor y mas precisa.



b) Geometría del corte; ángulos de la herramienta.

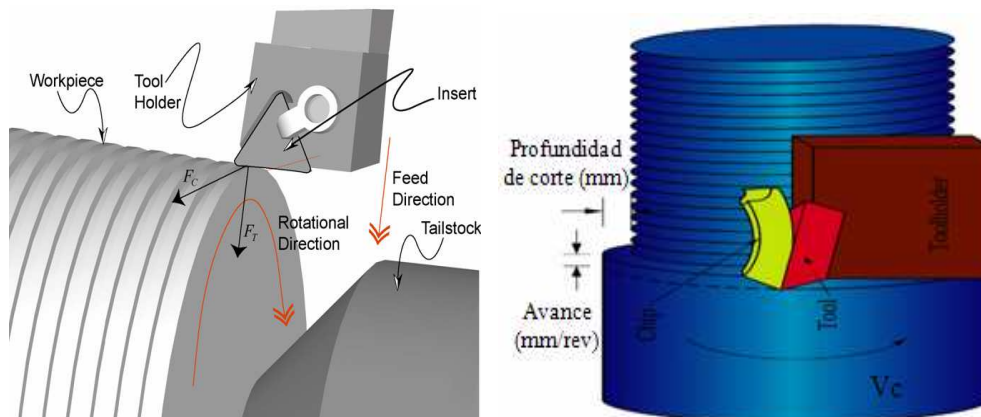


FIGURA 2.1.3. Esquema real del proceso [10].

Los datos y resultados experimentales de este proyecto han sido obtenidos sobre un proceso de cilindrado exterior de la pieza (figura 2.1.3.) mediante corte ortogonal. La profundidad del corte es $p = x$, con un avance de $a = 0,1 \text{ mm}$, ambos constantes en todas las simulaciones al igual que el ángulo de desprendimiento de la herramienta que es $\gamma = 0^\circ$ y el ángulo de incidencia $\alpha = 7^\circ$.

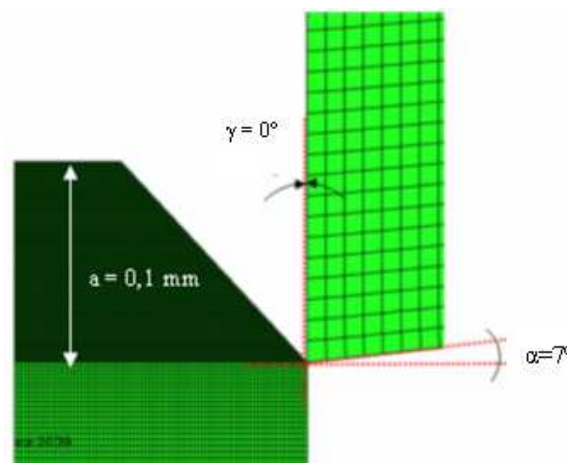


FIGURA 2.1.4. Ángulos y geometría del proceso.

c) Parámetros del corte; velocidad de corte, tiempos de corte, fricción, condiciones de contorno.

Las velocidades de corte variaran entre 2 m/s (120 m/min) y 25 m/s (1500 m/min). El valor de entrada de la fricción en el modelo entre las superficies de la herramienta y la viruta será constante para todos los casos y de valor $\mu = 0.1$. En cuanto al tiempo de corte, dependerá de la velocidad con la que se realice el proceso, y de la distancia que se mecanice. La longitud máxima que se puede mecanizar es de 0,0017 m.

$$T_i = S / V_c$$

Las condiciones de contorno son las que indica la (figura 2.1.5.). En la base el movimiento vertical y horizontal al igual que las reacciones en dirección X son nulas. En los contornos laterales el desplazamiento horizontal es cero y la superficie superior esta libre. La herramienta se supone un elemento rígido que no sufre deformación alguna.

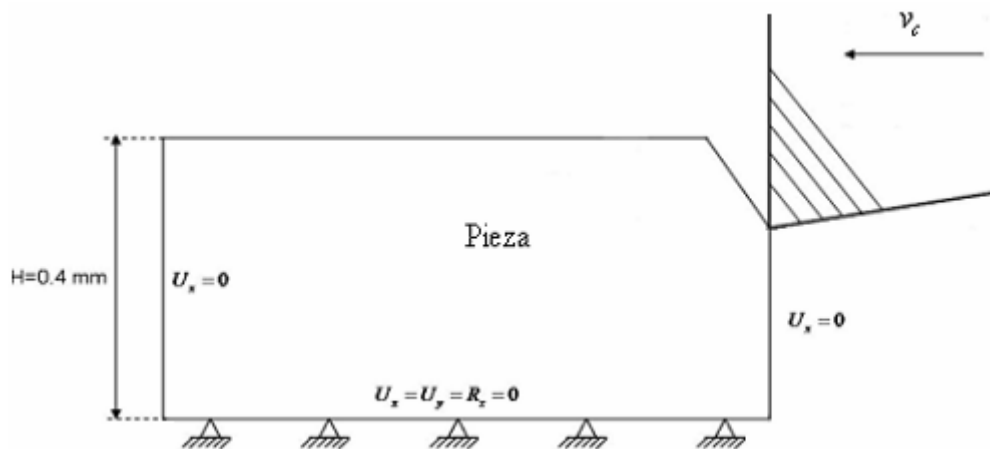


FIGURA 2.1.5. Esquema de las condiciones de contorno del modelo.



2.2. CRITERIOS DE ROTURA DINÁMICA Y LEY CONSTITUTIVA DEL MATERIAL IMPLEMENTADA. [8] [9] [15] [18]

En este modelo, el material es considerado un medio continuo homogéneo, es decir, se supone que las propiedades mecánicas son idénticas de un punto a otro del material. En estas condiciones, el material rompe en los puntos más solicitados y la rotura progresa a medida que en otros puntos del elemento se alcanzan las tensiones o deformaciones que especifica el criterio de rotura (*figura 2.1.6.*).

La *ecuación constitutiva* utilizada para simular el comportamiento del material a altas velocidades es la de *Johnson-Cook*. La ecuación de *Johnson-Cook* viene definida e implementada en ABAQUS y es una expresión empírica que relaciona la tensión efectiva (tensión de **Von Mises**) σ con la deformación efectiva ε .

El modelo de Johnson-Cook es probablemente el modelo termoviscoplastico mas extendido en la actualidad entre los códigos de simulación numérica por elementos finitos. Se emplea con éxito en problemas en los que el material esta sometido a altas velocidades de deformación: impacto balístico, mecanizado, conformado rápido [7].

$$\sigma = \left(A + B\varepsilon^n \right) \left(1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_r} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right)$$

A = Limite elástico.

B = Factor de endurecimiento por deformación.

C = Coeficiente de sensibilidad a la velocidad de deformación.

n = Coeficiente de sensibilidad al endurecimiento por deformación.

m = Coeficiente de sensibilidad con la temperatura.

ε = Deformación plástica equivalente.

$\dot{\varepsilon}_r$ = Velocidad de deformación plástica de referencia [$10^{-3} s^{-1}$].

T_{melt} = Temperatura de fusión (1570 K).

T_0 = Temperatura ambiente (300 K).



Los metales presentan generalmente una marcada sensibilidad a la velocidad de deformación y cuando esta alcanza valores elevados, el material puede sufrir un calentamiento adiabático por deformación plástica que, a efectos resistentes, se traduce en un ablandamiento. Es por tanto, necesario emplear una ley de endurecimiento dependiente de la deformación plástica equivalente ε , velocidad de deformación $\dot{\varepsilon}$ y de la temperatura $\left(\frac{T-T_0}{T_{melt}-T_0}\right)^m$ [7].

Endurecimiento por deformación ($A + B\varepsilon^n$): El metal al ser deformado tiende a compactarse o enmarañarse aumentando así su resistencia. Si se varía el coeficiente (n) aumentando su valor, el material se hará más sensible al endurecimiento por deformación y conforme es deformado mayor será su resistencia. Este factor hace que la curva tensión-deformación varíe aumentando la pendiente de la zona plástica.

Ablandamiento con la Temperatura $\left[\left(\frac{T-T_0}{T_{melt}-T_0}\right) < 1\right]^m$: La sensibilidad a la temperatura se controla con el parámetro (m), una disminución de este hará que el material sufra más, una variación de la temperatura, y se ablande. En este caso el modulo de elasticidad se ve reducido y con ello la curva tensión-deformación baja dando valores de la resistencia menores.

Velocidad de deformación: Este concepto mide el alargamiento o incremento de longitud que sufre el material en un intervalo de tiempo $\left(1 + C \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_r}\right)\right)$. El parámetro (C) mide la sensibilidad a una variación de la velocidad de deformación. Si (C) aumenta, el factor de velocidad de deformación aumentara y con ello la tensión y fuerza necesaria para deformar o romper el material. Si la velocidad de corte aumenta, la velocidad de deformación del material aumentara y este parámetro tendrá mayor importancia.



El criterio de rotura que se ha implementado en el modelo impone que dos elementos se separan en sus nodos si se alcanza un determinado valor de deformación de cizalladura $\left(\frac{\varepsilon}{\sqrt{3}}\right)$. Dependiendo de la zona del modelo el valor de esa deformación crítica varia (*figura 2.1.6.*).

Rotura por cizalladura cuando la deformación es mayor de 3 en la pieza-base, cuando es mayor de 4,5 en la viruta y si es mayor de 2 en la interfase viruta-pieza.

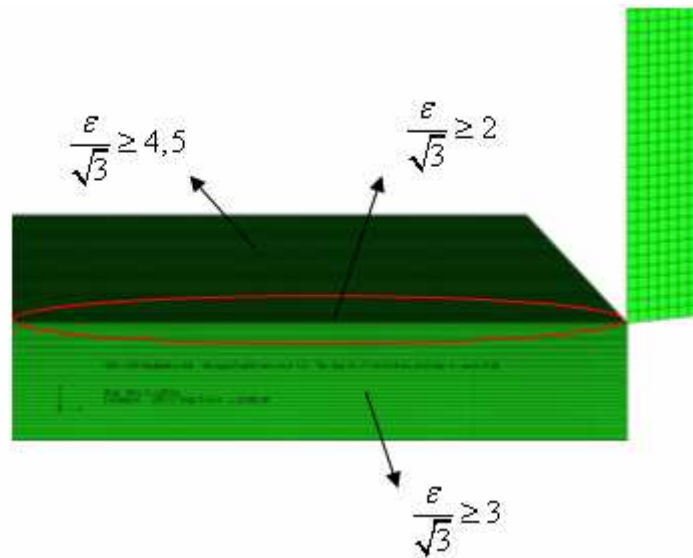


FIGURA 2.1.6. Zonas y criterios de rotura por deformación.



a) MATERIAL: INCONEL718 [24] [16].

Es un material elástico homogéneo e isótropo, por lo que presenta el mismo comportamiento mecánico para cualquier dirección de estiramiento alrededor de un punto. Debido a esa propiedad puede probarse que el comportamiento del material elástico homogéneo isótropo queda caracterizado por sólo dos constantes elásticas: el modulo de elasticidad E y el coeficiente de Poisson ν .

Desarrollado a comienzos de los años 60, el INCONEL 718 todavía se considera la opción para la mayoría de elementos de los motores en aviación con temperaturas de servicio por debajo de 650°C. INCONEL 718 es una aleación de *níquel-cromo* que contiene también cantidades significativas de hierro, niobio y de molibdeno junto con pocas cantidades de aluminio y titanio.

Combina resistencia a la corrosión y alta resistencia mecánica con excepcional soldabilidad incluyendo resistencia al agrietamiento. La aleación tiene alta resistencia a la ruptura hasta temperaturas de 700°C.

Tiene varias aplicaciones; espacio aéreo, turbinas de gas, motores de cohete, naves espaciales, lanzaderas espaciales, reactores nucleares, bombas, sellos de la bomba del turbo, y útiles. En la industria se puede encontrar en diversas formas: sección redonda, extrusionada, chapa, tubo, en forma de alambre.

Composición:

Elemento	Porcentaje
Carbono, C	0.20 - 0.80 %
Boro, B	≤ 0.0060 %
Aluminio, Al	≤ 0.080 %
Cromo, Cr	17.0 - 21.0 %
Cobalto, Co	≤ 1.0 %
Cobre, Cu	≤ 0.30 %
Hierro, Fe	17.0 %
Manganeso, Mn	≤ 0.35 %
Molibdeno, Mo	2.80 - 3.30 %
Níquel, Ni	50.0 - 55.0 %



Niobio, Nb (Columbio, Cb)	4.75 - 5.50 %
Fosforo, P	≤ 0.015 %
Silicio, Si	≤ 0.35 %
Azufre, S	≤ 0.015 %

Propiedades mecánicas:

Modulo de elasticidad, $E = 204,9$ GPa

Modulo de rigidez, $G = 77.2$ GPa

Coefficiente de poisson, $\nu = 0.33$

Propiedades físicas:

Densidad, $\rho = 8.19$ g/cm³

Propiedades térmicas:

Capacidad térmica específica 0.461 J/g°C

Conductividad térmica, $K = 11.4$ W/m-K (*baja en comparación con otros metales*).

Punto de fusión $1260 - 1336$ °C

Sólido, $T < 1260$ °C

Líquido, $T > 1336$ °C



3. DESCRIPCION DE LAS SIMULACIONES REALIZADAS Y RESULTADOS A OBTENER.

En el presente proyecto, tiene un gran peso el trabajo experimental y analítico llevado a cabo mediante el MEF. A continuación se expondrán las características de las diferentes simulaciones realizadas, a partir del modelo inicial anteriormente descrito.

Se debe destacar que este ha sido un trabajo inicialmente mas intuitivo que analítico ya que primero se han tenido que definir que valor tomaran las variables independientes del estudio, antes de pasar al proceso de simulación y analítico.

Los análisis realizados han implicado grandes volúmenes de información y la repetición del mismo proceso varias veces con diferentes parámetros, incluso en ocasiones debido a que los resultados no eran los esperados. Esto a supuesto gran parte del tiempo total empleado en la ejecución del proyecto y una metodología de trabajo bastante organizada.

A partir del modelo inicial (.INP) expuesto anteriormente, se han elaborado nuevos .INP's modificando parámetros y variables, como:

- Velocidad de corte.
- Parámetros de *Johnson-Cook* (C, n, m).
- Valor del tiempo de cálculo para simular la misma longitud de material mecanizado ($S = 0.0017$ m).
- La frecuencia o tiempo de grabación de los resultados en el *output history* del .OBD, para obtener aproximadamente unos 200 puntos de información.

La longitud mecanizada en cada simulación siempre será la misma ($S = 0.0017$ m), por lo tanto dependiendo de la velocidad de corte, el tiempo del proceso será mayor para velocidades pequeñas y más bajo para las velocidades grandes, pero todos ellos el orden de los micro-segundos (μs).

Una vez iniciadas las simulaciones, estas se han considerado óptimas en cuanto se ha observado que el proceso comienza a ser repetitivo o estacionario, con el fin de ahorrar tiempo de cálculo y no llevar la simulación hasta el final.



Comentar que alguno de los casos resueltos ha sido abortado antes de tiempo por el software ABAQUS, debido a que existía una gran distorsión en las soluciones y por ello los resultados obtenidos no han sido del todo satisfactorios.

Para no generar un volumen de información y de puntos de estudio demasiado grande para poder trabajar con ellos, se ha considerado que un conjunto de aproximadamente 200 puntos es suficientemente representativo.

Todo esto ha dado lugar a definir para el análisis, tres bloques de simulaciones:

BLOQUE JC^0

Características: Mallado fino, rango de velocidades de corte y parámetros de *Johnson-Cook* iniciales (JC^0) [16].

TABLA 3.1. Simulaciones para Johnson-Cook inicial (JC^0).

Nº Simulación	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
V_c (m/s)	2	4	6	8	10	12	14	20	25
V_c (m/min)	120	240	360	480	600	720	840	1200	1500
Parámetros de Johnson-Cook iniciales (JC^0):									
A= 450 Mpa B= 1700 Mpa C=0.017 n=0.65 m=1.3									

Para este primer bloque, los resultados a extraer de las simulaciones son:

- Gráfica de las *Fuerzas de corte* en función del tiempo de corte (F_c media máxima).
- Gráfica de las *Fuerzas de avance* en función del tiempo de corte (F_a media máxima).
- Se medirán los tiempos de aparición de la *banda de cizalladura* primaria y se calculará su *frecuencia*.
- Gráficas del valor de las *deformaciones* en función de la longitud local medida sobre un *path* (línea) generado, perpendicular a la banda primaria de cizalladura. De esta, se sacará un *ancho medio aproximado de banda* y seguidamente se observará como varía respecto a la velocidad de corte.



BLOQUE JC^0

Características: Mallado fino, menor rango de velocidades de corte y variación independiente de tres de los parámetros de la ecuación constitutiva de *Johnson-Cook* iniciales (C , n , m).

Parámetros iniciales (JC^0): $A=450$ Mpa $B=1700$ Mpa $C=0.017$ $n=0.65$ $m=1.3$.

TABLA 3.2. Simulaciones para *Johnson-Cook* iniciales (JC^0), variando los parámetros C , n y m .

Nº Simulación	Vc		C	n	m
	m/min	m/s			
S10	360	6	0.022	0.65	1.3
S11	360	6	0.017	1	1.3
S12	360	6	0.017	0.65	2
S13	720	12	0.022	0.65	1.3
S14	720	12	0.017	1	1.3
S15	720	12	0.017	0.65	2
S16	1200	20	0.022	0.65	1.3
S17	1200	20	0.017	1	1.3
S18	1200	20	0.017	0.65	2

Para este segundo bloque, los resultados a extraer de las simulaciones son los mismos que para el primer bloque, pero en este caso entraran en juego tres variables mas, que son los parámetros de *Johnson-Cook*: C , n , m .



BLOQUE JC^I

Características: Mallado fino, rango de velocidades de corte y diferentes parámetros de la ecuación constitutiva de *Johnson-Cook* (JC^I) [17].

TABLA 3.3. Simulaciones para *Johnson-Cook* uno (JC^I).

Nº Simulación	S19	S20	S21	S22
V_c (m/s)	2	4	6	8
V_c (m/min)	120	240	360	480
Parámetros de <i>Johnson-Cook</i> (JC^I): A= 400 Mpa B= 1798 Mpa C=0.0312 n=0.9143 m=1.03				

Para el tercer bloque, los resultados a extraer de las simulaciones son:

- Grafica de las *Fuerzas de corte* en función del tiempo de corte (F_c media máxima).
- Grafica de las *Fuerzas de avance* en función del tiempo de corte (F_a media máxima).
- Se medirán los tiempos de aparición de la banda de cizalladura primaria y se calculara su *frecuencia*.

También se obtendrán las *longitudes de contacto* características de la interfase viruta-herramienta, para las velocidades de 2, 4, 6, 8 m/s, con los distintos grupos de parámetros de *Johnson-Cook* (JC^0 y JC^I) respectivamente.

TABLA 3.4. Casos para los cuales se ha medido la longitud de contacto viruta-herramienta.

Parámetros de <i>Johnson-Cook</i> iniciales (JC^0): A= 450 Mpa B= 1700 Mpa C=0.017 n=0.65 m=1.3				
V (m/s)	4	6	10	20
Parámetros de <i>Johnson-Cook</i> (JC^I): A= 400 Mpa B= 1798 Mpa C=0.0312 n=0.9143 m=1.03				
V (m/s)	4	6	10	20



Otro objeto de estudio interesante, será el tipo de *morfología de la viruta* generada. Según lo expuesto en el *punto 1.5.1*, la velocidad de corte tiene gran influencia en el tipo de viruta, como también la tiene las propiedades y características del material (parámetros de *Johnson-Cook*). Serán las variaciones de estos parámetros lo que se intentara relacionar con la forma de la viruta desprendida.



4. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

El primer paso será obtener el valor de las fuerzas globales tanto de *corte* como de *avance* respecto al tiempo que dura el proceso. De estos gráficos se sacaran las fuerzas máximas para cada velocidad de corte y se observara la influencia de este parámetro.

Este análisis se realizara para las simulaciones del *bloque JC⁰* y se comparara con las del *bloque JC⁰'* y *JC^l*, anteriormente descritas.

BLOQUE *JC⁰*:

TABLA 4.1. Simulaciones para el Bloque *JC⁰*.

Nº Simulación	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
<i>V_c</i> (m/s)	2	4	6	8	10	12	14	20	25
<i>V_c</i> (m/min)	120	240	360	480	600	720	840	1200	1500
Parámetros de Johnson-Cook iniciales (<i>JC⁰</i>):									
A= 450 Mpa B= 1700 Mpa C=0.017 n=0.65 m=1.3									

a) Resultados de las Fuerzas de Corte y Fuerzas de Avance de las simulaciones del *bloque JC⁰*:

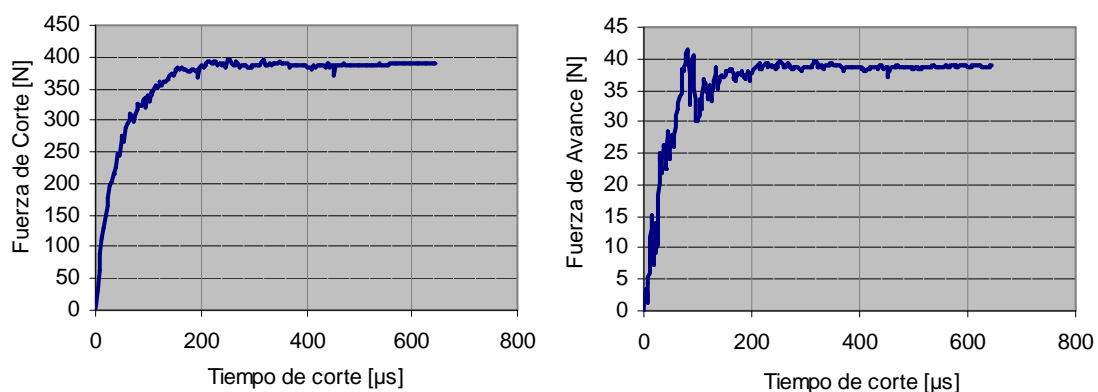


FIGURA 4. 1. Fuerza de corte y fuerza de avance en función del tiempo para S1 $v_c = 2 \text{ m/s}$.



La representación de la fuerza de corte en función del tiempo para $V_c = 2\text{m/s}$, con los parámetros de Johnson Cook del *bloque JC⁰*, expresa un accenso brusco de la fuerza al inicio del proceso (*figura 4.1.*), hasta que a los $200\text{ }\mu\text{s}$ alcanza un valor estable que conserva hasta el final del corte y que es aproximadamente de unos 389 N .

Respecto a la fuerza de avance, muestra una mayor inestabilidad, hasta conseguir su constancia al mismo tiempo que la fuerza de corte y tomando un valor de $38,89\text{ N}$.

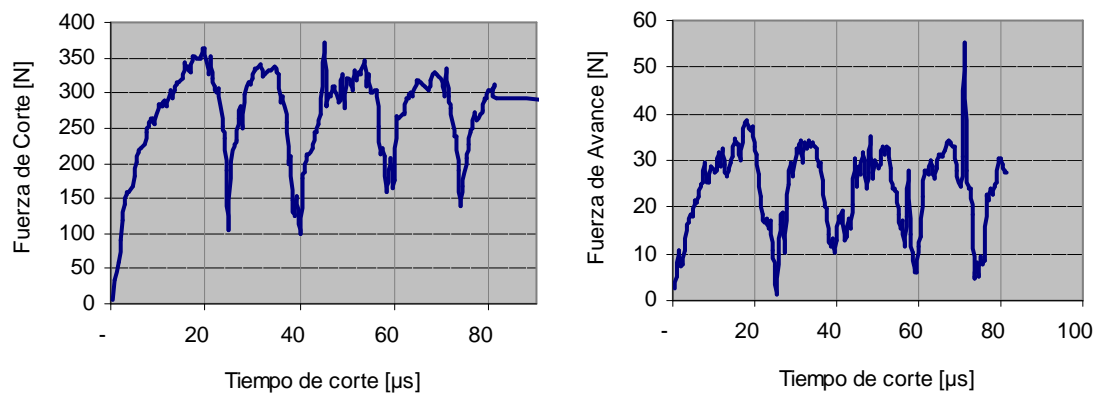


FIGURA 4. 2. Fuerza de corte y fuerza de avance en función del tiempo para S6 $v_c = 12\text{m} / \text{s}$.

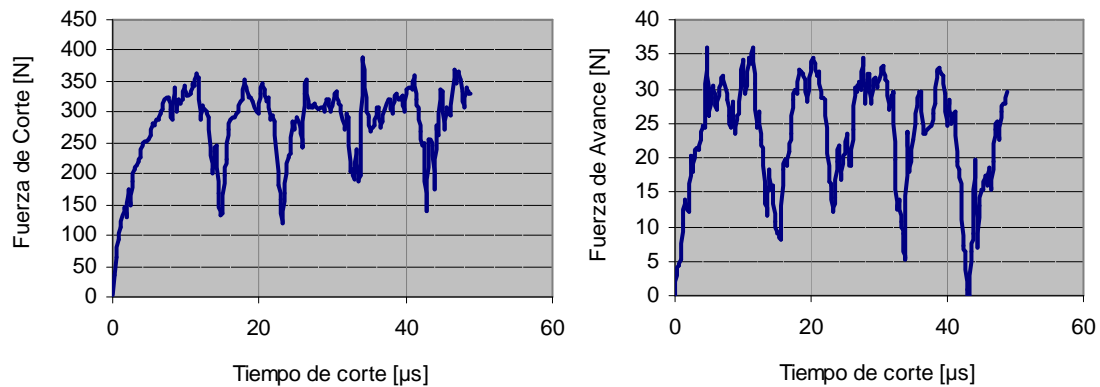


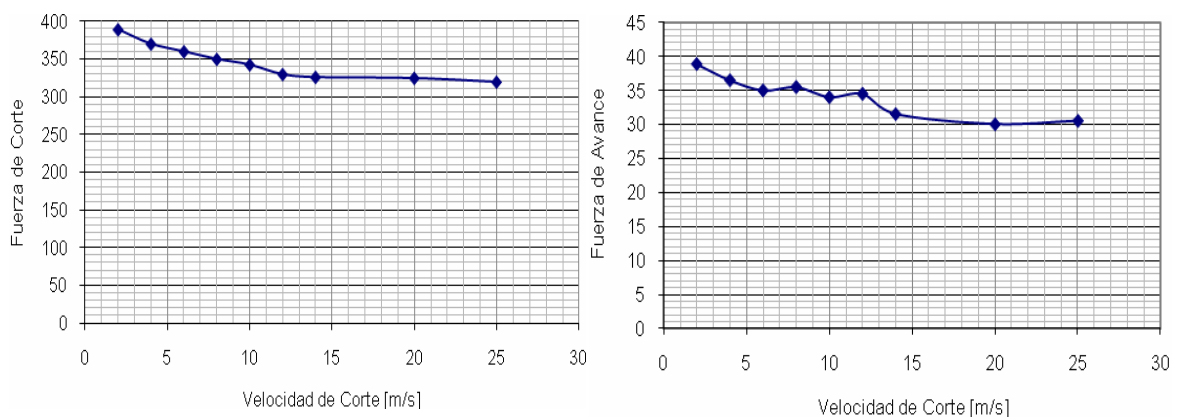
FIGURA 4. 3. Fuerza de corte y fuerza de avance en función del tiempo para S8 $v_c = 20\text{m} / \text{s}$.

TABLA 4.2. Resumen de las fuerzas de corte y avance para todas las velocidades del Bloque JC⁰.

Velocidad (m/s)	Fuerza de Corte (N)	Fuerza de Avance (N)
2	389	38,89
4	370	36,5
6	360	35
8	350	35,5
10	342,66	34
12	330	34,5
14	326,25	31,5
20	325	30
25	320	30,5

Las figura 4.2. y 4.3., representan un ejemplo de las fuerzas de corte y de avance para las $V_c = 12$ y 20 m/s respectivamente. En ellas se observa un cambio brusco en la forma y en la tendencia a estabilizarse respecto al caso de la $V_c = 2$ m/s.

Se tienen picos de fuerza con una frecuencia que tiende a ser constante hasta el punto de poder considerarla estable y de sacar un valor medio máximo de la misma, lo mismo sucede con el resto de velocidades (tabla 4.2.). Como se comento en el punto 1.5.1. esta variación brusca de la fuerza tanto de corte como de avance, pueden ser motivo de una segmentación incluso discontinuidad de la viruta, mas adelante en el estudio de la morfología de la misma, sobre las simulaciones, se observara si tienen relación ambos sucesos.

FIGURA 4. 4. Fuerzas de corte y de avance en función de la velocidad de corte para JC⁰.



Junto con la *tabla 4.2.*, las *figuras 4.4.*, muestran la evolución de las fuerzas de corte y de avance en función de la velocidad de corte, en ambos casos se observa como ambas disminuyen al aumentar la velocidad, pasando de 389 N para $V_c=2$ m/s a 320 N para $V_c=25$ m/s, $\Delta F = 69$ N. Estos resultados coinciden con lo expuesto teóricamente en el *punto 1.5.2.*, dan una idea de cómo se comporta el INCONEL 718 a altas velocidades de corte, disminuye su resistencia porque el material se ablanda debido al aumento de la temperatura en la zona de corte ya que hay menos tiempo para disipar el calor.

BLOQUE JC¹

TABLA 4.3. Simulaciones para el Bloque JC¹.

Nº Simulación	S19	S20	S21	S22
V_c (m/s)	4	6	10	20
V_c (m/min)	240	360	600	1200
Parámetros de Johnson-Cook (JC¹):				
A= 400 Mpa B= 1798 Mpa C=0.0312 n=0.9143 m=1.03				

Tras los resultados obtenidos para las simulaciones con los parámetros de JC⁰ sobre un amplio rango de velocidades, el objetivo ahora es ver si la tendencia es la misma para otro conjunto de parámetros de *Johnson-Cook* (JC¹) que cambian el comportamiento del material. Para ello se ha tomado un rango más pequeño de velocidades (*tabla 4.3.*).



b) Resultados de las Fuerzas de Corte y Fuerzas de Avance de las simulaciones del bloque JC^I :

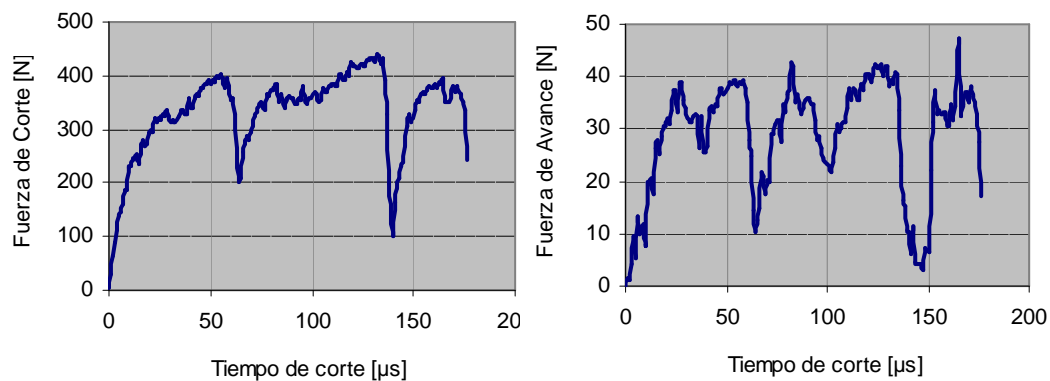


FIGURA 4. 5. Fuerza de corte y fuerza de avance en función del tiempo para S 20 $v_c = 6m / s$.

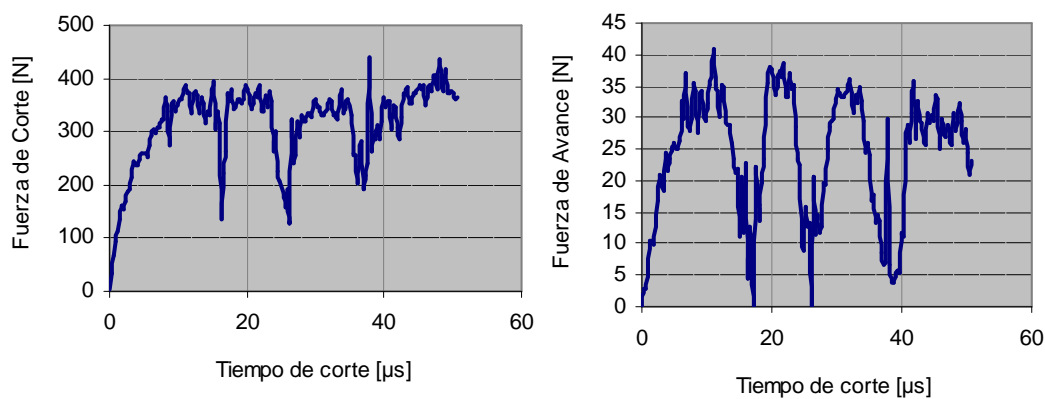


FIGURA 4. 6. Fuerza de corte y fuerza de avance en función del tiempo para S 22 $v_c = 20m / s$.

En este caso se sigue observando una tendencia oscilatoria de la fuerza, dando unos picos que se pueden ver en las figuras 4.5. y 4.6. para las velocidades 6 y 20 m/s.

TABLA 4.4. Resumen de las fuerzas de corte y avance para todas las velocidades del bloque JC^I .

Velocidad (m/s)	Fuerza de Corte (N)	Fuerza de Avance (N)
4	430	42,7
6	386,66	38,1
10	361,2	35,9
20	358,7	35,2

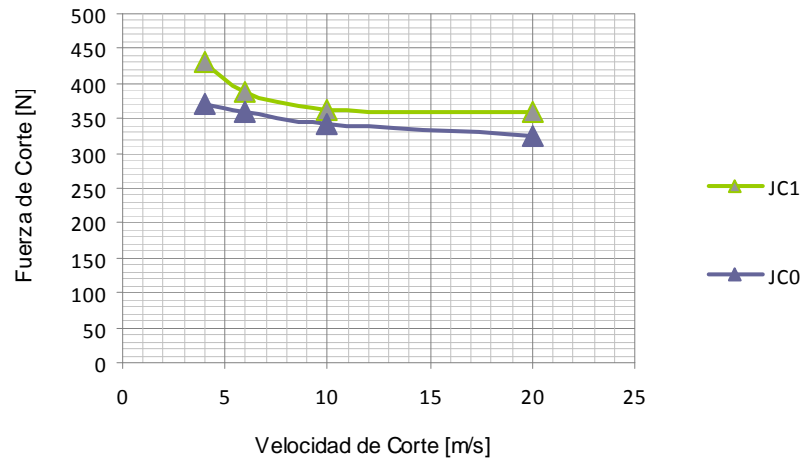


FIGURA 4. 7. Comparación de la fuerza de corte para JC^0 y JC^I en función de la velocidad.

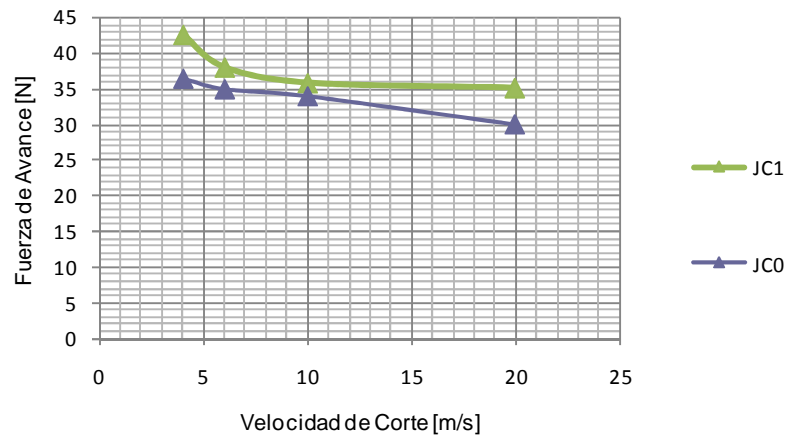


FIGURA 4. 8. Comparación de la fuerza de avance para JC^0 y JC^I en función de la velocidad.

En la *tabla 4.4.* se recogen los valores obtenidos de las fuerzas medias máximas para el *bloque* JC^I con los parámetros de *Johnson Cook 1*, la evolución es la misma tanto para la fuerza de corte como para la fuerza de avance, decrecen con la velocidad de corte.

Sobre las *figuras 4.7. y 4.8.* se realiza una comparación entre los dos *bloques* JC^I y JC^0 , es decir que se puede observar como influye la utilización de los parámetros de JC^0 o de los de JC^I . En ambos casos las fuerzas de corte y avance decrecen, pero con los parámetros de *Jonson-Cook 1*, el material presenta mayor resistencia al corte ya que las fuerzas resultantes son ligeramente mayores que para JC^0 sobre todo para las velocidades bajas y altas. Por ejemplo, para $V_c = 4 \text{ m/s}$ y JC^I la $F_c = 430 \text{ N}$ mientras que para JC^0 la $F_c = 370 \text{ N}$, lo que supone una disminución de 60 N , prácticamente lo mismo que se consigue pasando de 2 a 25 m/s con los parámetros de JC^0 .



c) Análisis de la frecuencia de aparición de la banda primaria de cizalladura para las simulaciones de los bloques JC^0 y JC^I :

Para las simulaciones del bloque JC^I y JC^0 , se ha ido observando como se genera la banda primaria de cizalladura, tomando nota de los tiempos de aparición de las mismas. El fin, es obtener como varia la frecuencia de aparición de estas zonas de cizalladura en función de la velocidad de corte.

La metodología a seguir, ha sido, atender a la aparición de las tres primeras bandas que se generan en el proceso, tomar nota de los tiempos, calcular los incrementos entre una y otra y sacar una media de las frecuencias. Algunas de las simulaciones no han permitido llegar a ver las tres primeras bandas generadas debido a la distorsión en las soluciones, y se han tomado los datos de las dos primeras.

A continuación se muestra un ejemplo completo para el proceso de torneado a una velocidad de corte de 20 m/s del bloque JC^0 (tabla 4.5.).

BLOQUE JC^0

TABLA 4.5. Frecuencias de aparición de la banda de cizalladura para $V_c = 20$ m/s del bloque JC^0 .

Vc = 20 m/s	t (s)	At (s)	f (Hz)
BANDA1	1,36E-05	1,36E-05	7,35E+04
BANDA2	2,21E-05	8,50E-06	1,18E+05
BANDA3	3,23E-05	1,02E-05	9,80E+04
Frecuencia media (KHz)			96,4 KHz

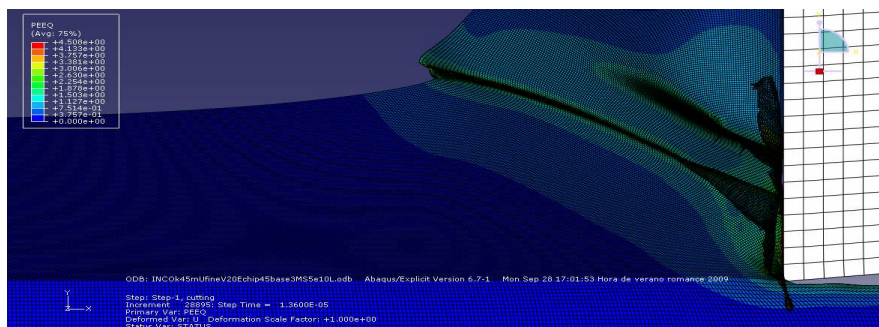
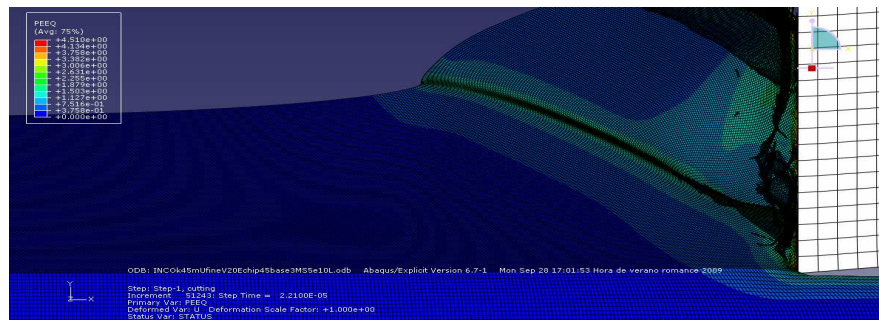
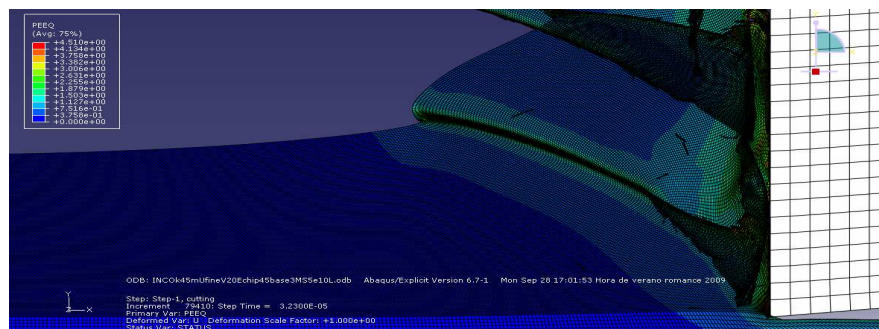


FIGURA 4. 9. 1ª Banda para $t = 13.6 \mu s$.

FIGURA 4. 10. 2ª Banda para $t = 22.1 \mu s$.FIGURA 4. 11. 3ª Banda para $t = 32.3 \mu s$.

Para el resto de velocidades del *bloque JC⁰*:

TABLA 4.6. Frecuencias de aparición de la banda de cizalladura para el resto de velocidades del *bloque JC⁰*.

Velocidad (m/s)	Frecuencia media (KHz)
2	No se genera una banda clara de cizalladura
4	17,6
6	19,6
8	31,1
10	40
12	56,6
14	65,9
20	96,4
25	120

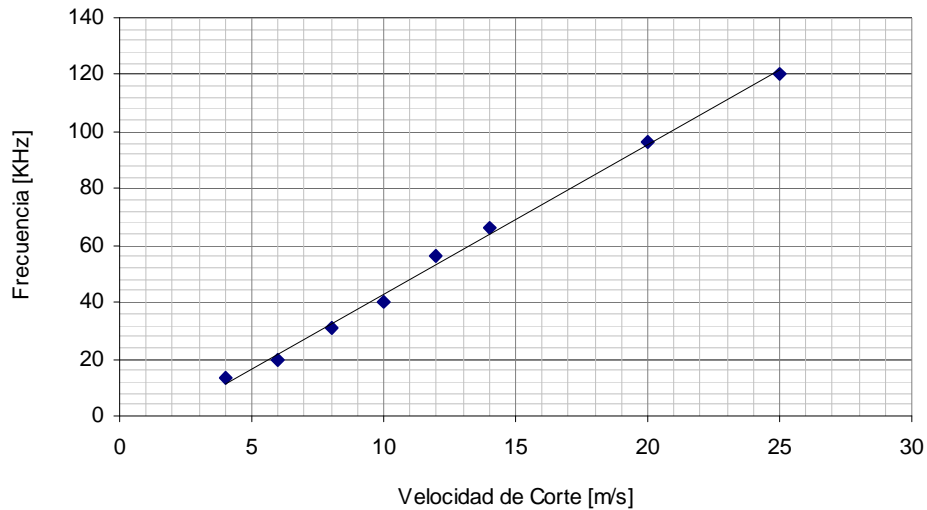


FIGURA 4. 12. Variación de la frecuencia de aparición de la banda de cizalladura en función de la velocidad de corte para el bloque JC^0 .

En la *tabla 4.6.*, se recogen los resultados obtenidos para las frecuencias medias de aparición de las zonas primarias de cizalladura en los casos del *bloque JC^0* y cabe destacar que para la $V_c = 2$ m/s, la aparición de este fenómeno no es del todo claro como para tenerlo en cuenta.

Estos resultados se han enfrentado a la velocidad de corte en la *figura 4.12.* y en ella se observa una tendencia prácticamente lineal con una determinada pendiente ascendente, lo que descubre que para estos parámetros de JC^0 , el intervalo de tiempo entre la aparición de una banda y otra es menor conforme se aumente la velocidad de corte. Esto quiere decir que si la deformación es suficientemente grande en estas zonas, la segmentación o discontinuidad de la viruta será mayor a velocidades grandes.

Con el fin de observar si esta tendencia de la frecuencia es un resultado fiable calculándola con este modelo sobre el INCONEL 718, en la *figura 4. 13.* se comparan los resultados obtenidos con los conseguidos sobre el TITANIO [25] en un ensayo experimental (*figura 4.14.*) y se encuentra cierta analogía.

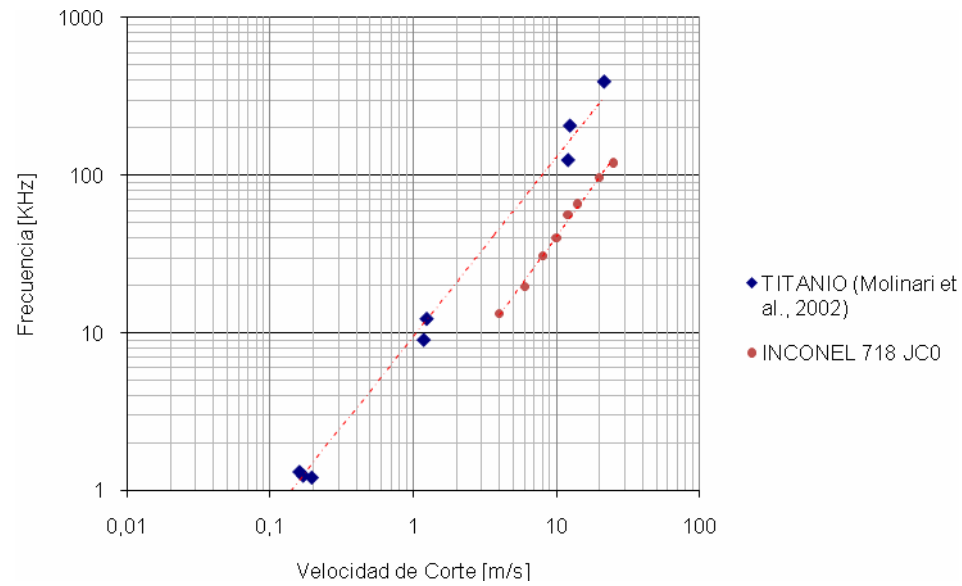


FIGURA 4. 13. Comparación de la frecuencia de aparición de la banda de cizalladura en función de la velocidad de corte para el INCONEL 718 (JC^0) y el TITANIO.

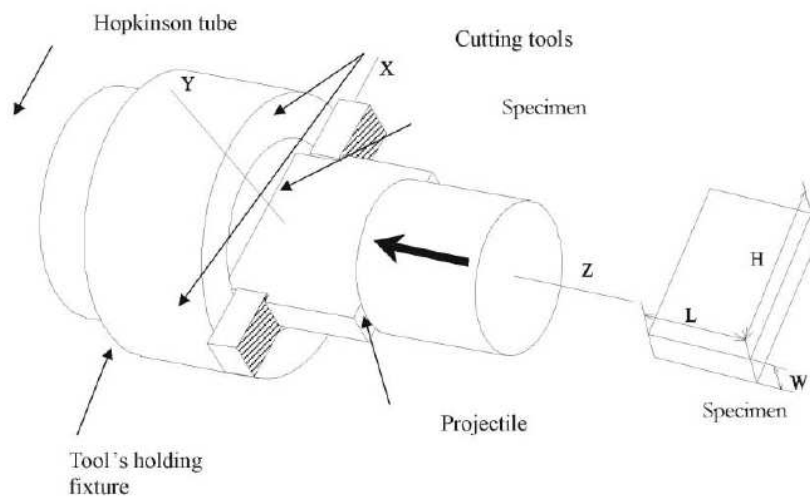


FIGURA 4. 14. Esquema del ensayo experimental realizado sobre el TITANIO.[25]



¿Y si se aplican los parámetros de JC^I ?, según el anterior estudio para estos parámetros se necesitan mayores fuerzas de corte para generar la viruta, lo que quiere decir que ejerce mayor resistencia a la deformación, por consiguiente la frecuencia de aparición de estas bandas de deformación debería ser menor, veamos:

BLOQUE JC^I

TABLA 4.7. Frecuencias de aparición de la banda de cizalladura para las velocidades del bloque JC^I .

V20	t (s)	At(s)	f(Hz)
BANDA1	1.53E-05	1.53E-05	6.54E+04
BANDA2	2.47E-05	9.35E-06	1.07E+05
BANDA3	3.57E-05	1.11E-05	9.05E+04
V10	t (s)	At(s)	f(Hz)
BANDA1	3.06E-05	3.06E-05	3.27E+04
BANDA2	5.10E-05	2.04E-05	4.90E+04
BANDA3	8.67E-05	3.57E-05	2.80E+04
V6	t (s)	At(s)	f(Hz)
BANDA1	6.44E-05	6.44E-05	1.55E+04
BANDA2	1.37E-04	7.26E-05	1.38E+04
BANDA3	1.76E-04	3.90E-05	2.56E+04
V4	t (s)	At(s)	f(Hz)
BANDA1	1.34E-04	1.34E-04	7.46E+03
BANDA2	2.84E-04	1.50E-04	6.67E+03

Para este análisis también se ha acortado el rango de velocidades como indica la *tabla 4.7.* abarcando desde velocidades pequeñas a velocidades grandes.

TABLA 4.8. Frecuencia media de aparición de la banda de cizalladura para las velocidades del bloque JC^I .

Velocidad (m/s)	Frecuencia (KHz)
4	7.06
6	18,3
10	36,6
20	87,6

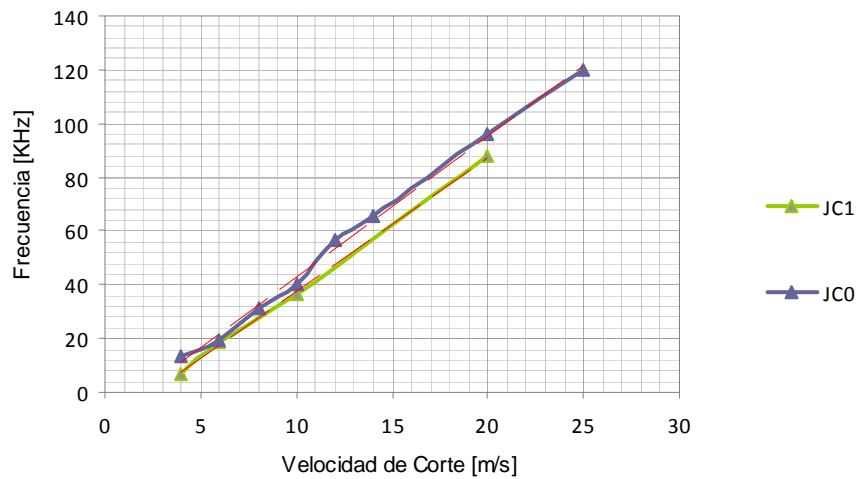


FIGURA 4. 13. Comparación de las frecuencias de aparición para JC^0 y JC^I en función de la velocidad de corte.

Efectivamente, según la figura 4.13., las frecuencias para JC^I siguen un orden ascendente pero ligeramente inferiores a las obtenidas para JC^0 , esto demuestra que el material definido con los parámetros de JC^I presenta más resistencia a la deformación que si se define con los de JC^0 , y por ello el tiempo de aparición entre banda y banda de cizalladura será mayor.

d) Análisis local del ancho de la banda de cizalladura para los casos del *bloque JC⁰*:

Sobre las bandas de cizalladura analizadas en las simulaciones del *bloque JC⁰*, se ha llevado a cabo un *análisis local* mediante la herramienta “*path*”, del nivel de deformación que sufre el material a lo largo de una distancia perpendicular a la banda.

A modo explicativo, se detallara la metodología seguida para aproximar el ancho de banda en el caso de $V_c = 20\text{m/s}$ (*tabla 4.9.*).

Gracias al archivo *.odb* que genera ABAQUS, se reproduce paso a paso el proceso de corte hasta que aparece la primera banda de cizalladura, previamente se ha seleccionado en “Field-Output” la opción de ver la *deformación plástica sobre los puntos integrados (PEEQ)*.

Sobre ella se genera una línea de puntos “*Tools – Path*” (*figura 4.14.*) lo más perpendicular posible a la banda, esta será la longitud sobre la que se medirá la deformación.

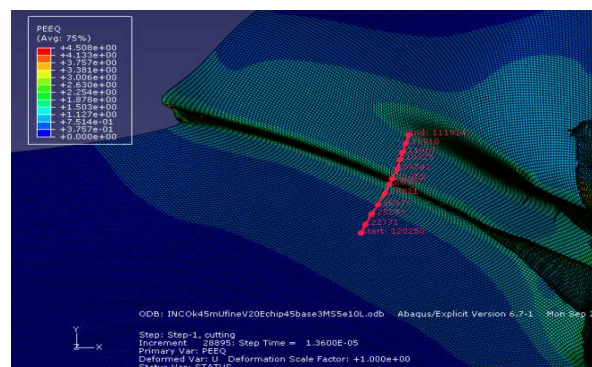


FIGURA 4. 14. Detalle de la longitud de estudio generada, perpendicular a la banda de cizalladura “*Path*”.

Mediante un grafico *X-Y*, se representa la deformación plástica sobre los puntos que forman la línea generada (*figura 4. 15.*).

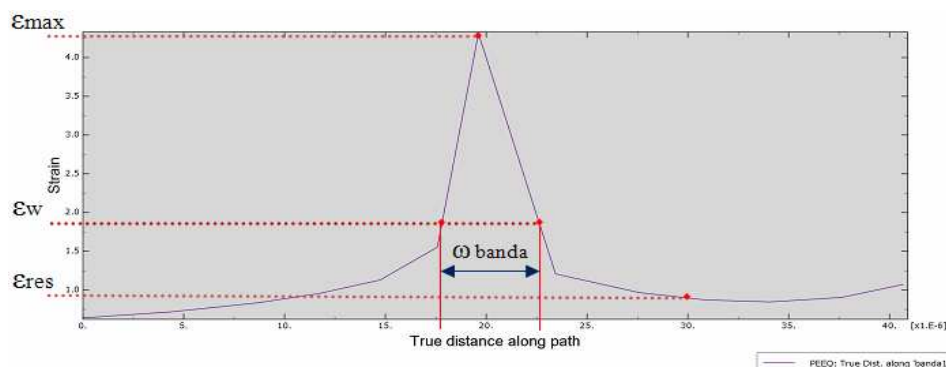


FIGURA 4. 15. Deformación plástica en función de la longitud del “*Path*”.



De la grafica, se extraen los valores de la deformación máxima que se produce en la banda y se aproxima el valor de la *deformación residual*, que es la deformación que se aleja de la zona critica de estudio y no interesa (*figura 4. 15.*).

Un 20% de la deformación máxima mas un 80% de la deformación residual, dará un valor de deformación que limitara el ancho de banda (*Ec. 4.4.1.*). Destacar que este método es a modo de aproximación, los porcentajes elegidos no están relacionados con ninguna teoría. De hecho un objeto de estudio futuro podría ser, ver, como varia este ancho variando los porcentajes aplicados.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{banda} &= \varepsilon_{\max} - \varepsilon_{res} \\ \varepsilon_{\omega} &= 20\% \varepsilon_{banda} + \varepsilon_{res} \\ \varepsilon_{\omega} &= 0.2 \varepsilon_{\max} + 0.8 \varepsilon_{res}\end{aligned}\quad (Ec. 4.4.1.)$$

TABLA 4.9. Valores aproximados del ancho de banda para la $V_c = 20$ m/s del bloque JC^0 .

$V_c = 20$ m/s	ε_{\max}	ε_{res}	ε_{banda}	ε_w	ω_{\min}	ω_{\max}	ω_{banda} (m)
BANDA1	4.31	0.90	3.40	1.58	1.76E-05	2.30E-05	5.37E-06
BANDA2	3.73	0.98	2.75	1.53	1.90E-05	2.68E-05	7.85E-06
BANDA3	3.26	0.9	2.36	1.37	1.92E-05	2.50E-05	5.83E-06

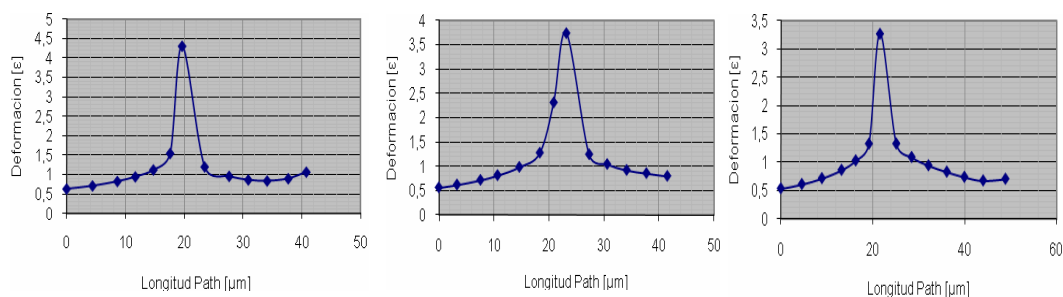


FIGURA 4. 16. Gráficos del ancho de banda en función de la longitud de estudio para la $V_c = 20$ m/s del bloque JC^0 .

A partir de las graficas de la *figura 4.16.* se sacan los valores de la *tabla 4.9.* aplicando el método descrito anteriormente.



Para el resto de velocidades del *bloque JC⁰* los resultados son los siguientes:

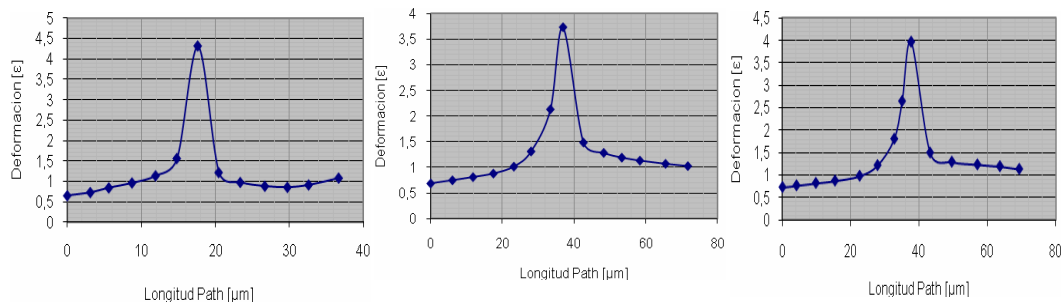


FIGURA 4. 17. Ancho de banda en función de la longitud de estudio para una $V_c=4$ m/s del bloque JC^0 .

TABLA 4.10. Valores aproximados del ancho de banda para $V_c= 4, 6, 8, 10$ m/s del bloque JC^0 .

V = 4 (m/s)	ε max	ε residual	ω banda (m)
BANDA1	3,257	1,11	1,27E-05
BANDA2	3,721	1,19	1,17E-05
BANDA3	3,96	1,29	3.28E-05
V = 6 (m/s)	ε max	ε residual	ω banda (m)
BANDA1	2,91	1,10	7,68E-06
BANDA2	4,34	0,95	9,03E-06
V = 8 (m/s)	ε max	ε residual	ω banda (m)
BANDA1	3,103	1,2	6,92E-06
BANDA2	3,98	1,1	7,06E-06
BANDA3	2,317	1,25133	1,25E-05
V = 10 (m/s)	ε max	ε residual	ω banda (m)
BANDA1	2,5	1,13	6,99E-06
BANDA2	3,83	1,01	8,17E-06

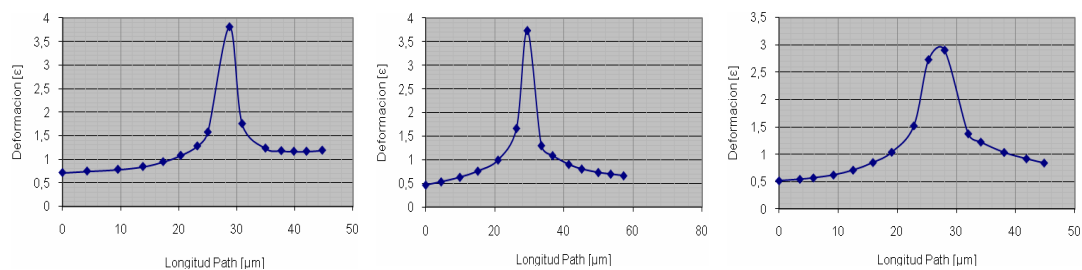


FIGURA 4. 18. Ancho de banda en función de la longitud de estudio para una $V_c=12$ m/s del bloque JC^0 .

TABLA 4.11. Valores aproximados del ancho de banda para $V_c=12, 14, 25$ m/s del bloque JC^0 .

V=12 (m/s)	ε max	ε residual	ω banda (m)
BANDA1	3,80	1,17	6,05E-06
BANDA2	3,73	0,80	9,21E-06
BANDA3	3,25	0,99	9,59E-06
V=14 (m/s)	ε max	ε residual	ω banda (m)
BANDA1	4	1,2	6,90E-06
BANDA2	3,95	0,9	6,60E-06
BANDA3	3,7766	0,941	6,81E-06
V=25 (m/s)	ε max	ε residual	ω banda (m)
BANDA1	3,01	1,03	6,10E-06
BANDA2	2,7	0,997	7,20E-06
BANDA3	2,89	0,965	6,60E-06

TABLA 4.12. Valores medios aproximados del ancho de banda para todas las velocidades del bloque JC^0 .

Velocidad (m/s)	ω medio (μm)	ω medio sin la primera banda (μm)
2	<i>No se definen claramente bandas 1ª de cizalladura.</i>	
4	11	11,7
6	8,35	9,03
8	9,8	9,78
10	7,58	8,17
12	8,28	9,4
14	7,23	6,9
20	6,35	6,84
25	6,63	6,90

Con el fin de tomar datos una vez estabilizado el proceso de corte, se calcula también el ancho de banda medio sin tener en cuenta el valor que se obtiene de la primera banda *tabla 4.12*.

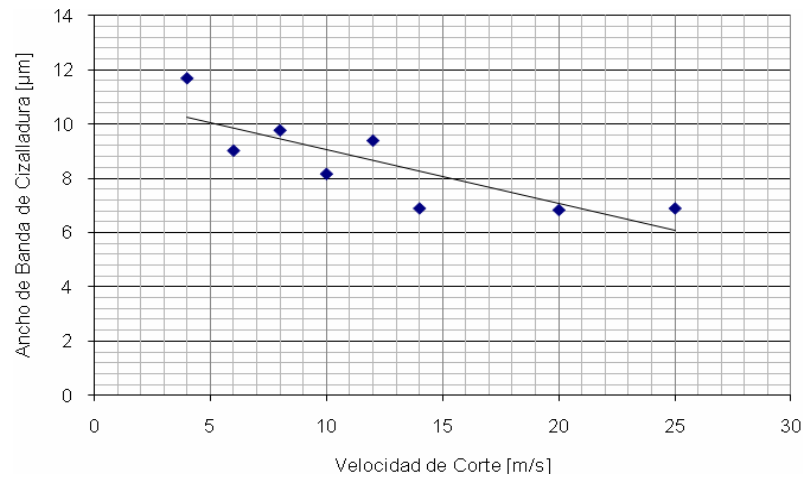


FIGURA 4. 19. Ancho de banda en función de la velocidad de corte para las simulaciones del bloque JC^0 .

En la *figura 4.19*. se representan en función de la velocidad de corte los valores de los anchos de banda calculados. Con los resultados obtenidos, se puede decir que la tendencia no sea muy clara, esto puede ser debido a que el modelo que se ha utilizado para su cálculo no es del todo preciso para medir este parámetro, se necesitaría un mallado más fino en la zona, para que la información recogida sea de mayor exactitud.



Para ver la influencia de los parámetros de *Johnson Cook* anteriormente citados (C , n , m) de manera independiente, se han llevado a cabo las simulaciones del *bloque JC0'* para un rango de velocidades más pequeño (6, 12 y 20 m/s), y los resultados han sido los siguientes.

BLOQUE JC0'

TABLA 4.13. Simulaciones para el Bloque JC0'.

Nº Simulación	Vc		C	n	m
	m/min	m/s			
S10	360	6	0.022	0.65	1.3
S11	360	6	0.017	1	1.3
S12	360	6	0.017	0.65	2
S13	720	12	0.022	0.65	1.3
S14	720	12	0.017	1	1.3
S15	720	12	0.017	0.65	2
S16	1200	20	0.022	0.65	1.3
S17	1200	20	0.017	1	1.3
S18	1200	20	0.017	0.65	2

e) Resultados de las Fuerzas de Corte y Fuerzas de Avance para el *bloque JC0'*:

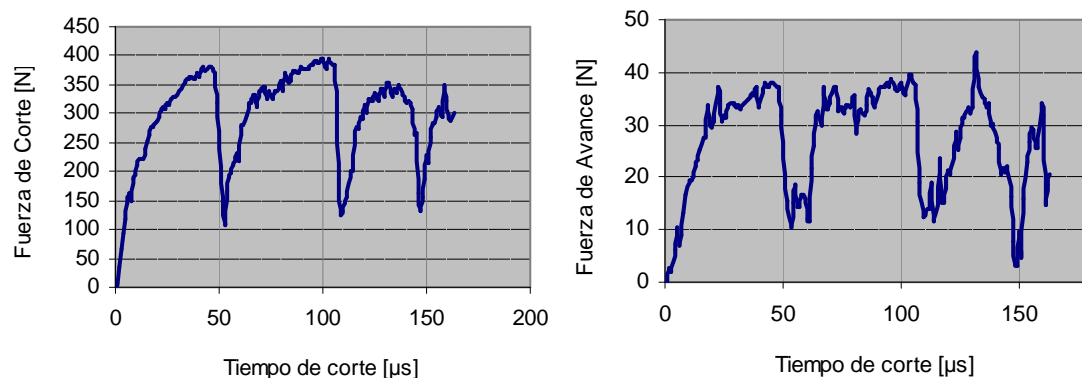


FIGURA 4. 20. Fuerza de corte y fuerza de avance en función del tiempo para S10: $V_c = 6 \text{ m/s}$, $C = 0.022$, $n = 0.65$, $m = 1.3$.

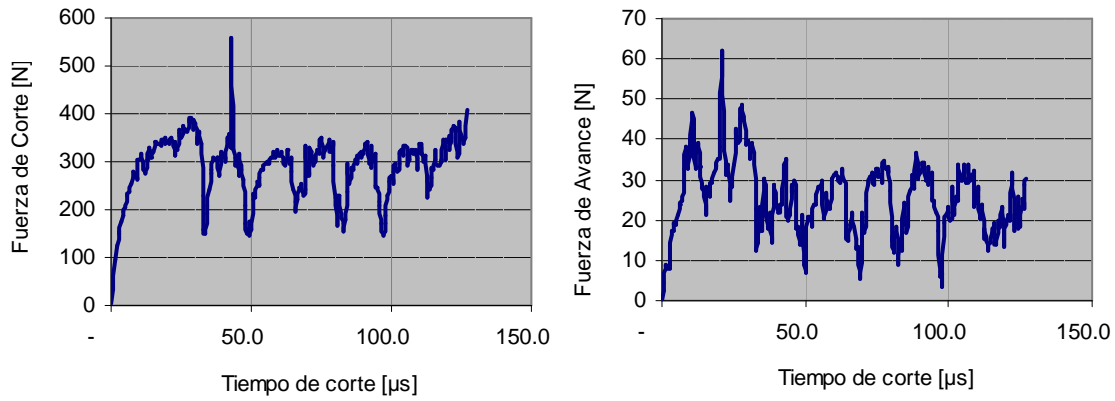


FIGURA 4. 21. Fuerza de corte y fuerza de avance en función del tiempo para la S13: $V_c=12$ m/s, $C=0.022$, $n=0.65$, $m=1.3$.

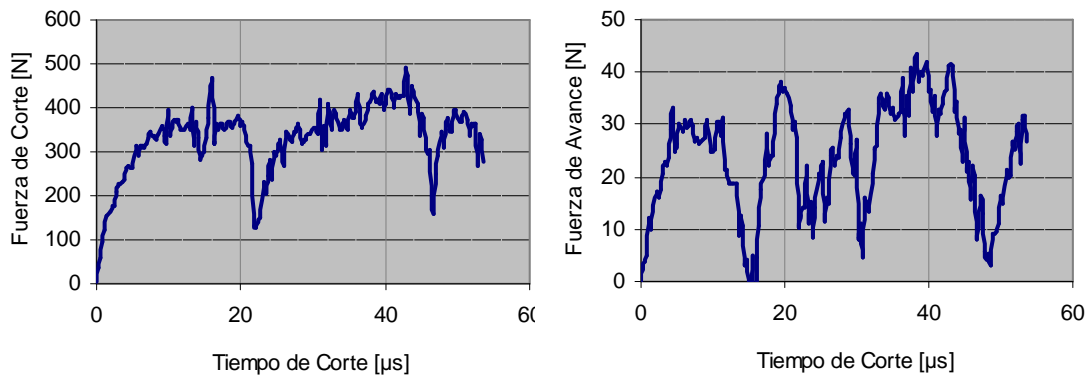


FIGURA 4. 22. Fuerza de corte y fuerza de avance en función del tiempo para la S18: $V_c=20$ m/s, $m=2$, $C=0.017$, $n=0.65$.

TABLA 4.14. Fuerzas de corte y fuerzas de avance para todos los casos del bloque JC0'.

Parámetro Variable	Velocidad (m/s)	Fuerza de Corte max (N)	Fuerza de Avance max (N)
n=1 $C=0.017$ $m=1.3$	6	410	39
n=1 $C=0.017$ $m=1.3$	12	384	40
n=1 $C=0.017$ $m=1.3$	20	340	34,5
m=2 $C=0.017$ $n=0.65$	6	380	38,5
m=2 $C=0.017$ $n=0.65$	12	375	38,7
m=2 $C=0.017$ $n=0.65$	20	366,66	35
C=0.022 $n=0.65$ $m=1.3$	6	374,3	36,43
C=0.022 $n=0.65$ $m=1.3$	12	334	34
C=0.022 $n=0.65$ $m=1.3$	20	338	33,25
JC0	6	360	35
JC0	12	330	34,5
JC0	20	325	30

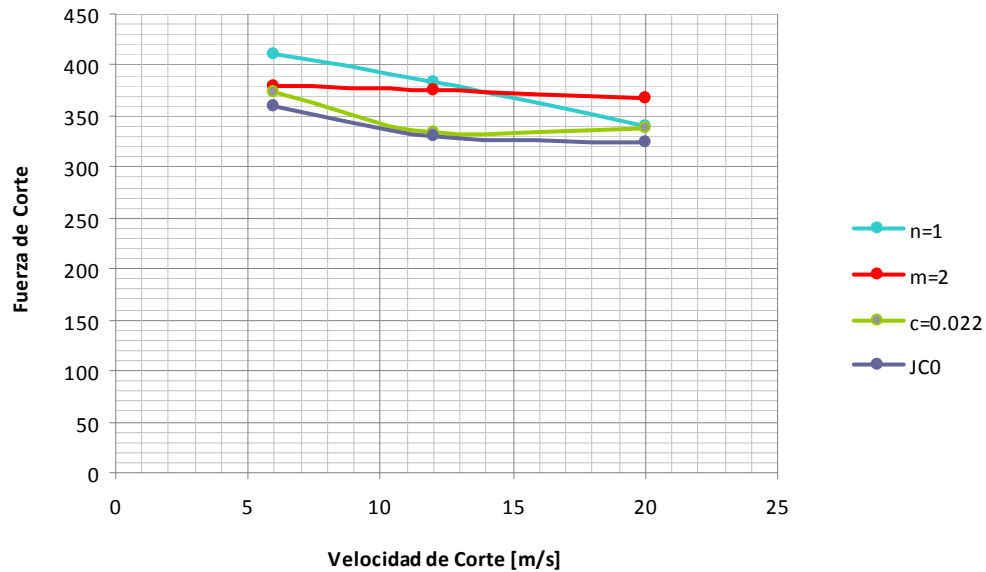


FIGURA 4. 23. Comparación de las fuerzas de corte (N) entre JC0 y los casos del bloque JC0' para $V_c = 6, 10, 20$ m/s.

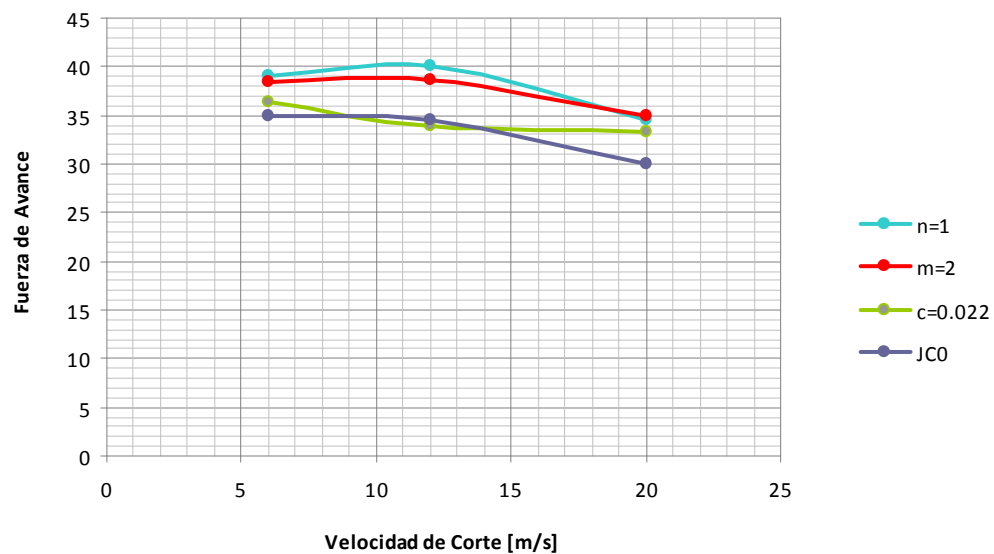


FIGURA 4. 24. Comparación de las fuerzas de avance (N) entre JC0 y los casos del bloque JC0' para $V_c = 6, 10, 20$ m/s.

Para ver como afecta en la fuerza de corte la variación de los parámetros C , n , m , en la figura 4.23. se representan los valores de las mismas en función de la velocidad de corte para cada caso, incluyendo el inicial JC^0 .

La línea de color morado nos indica la variación de la fuerza obtenida para JC^0 en el punto 4.a. el resto de trazos sigue una tendencia semejante ya que todos tienden a disminuir, lo que indica que la velocidad de corte es una variable en el proceso que afecta de igual forma aunque se varíen los parámetros de *Johnson-Cook*.



Aunque la tendencia sea la misma respecto a la velocidad de corte, se encuentran diferencias. La curva de color verde para el parámetro $C = 0,022$ se aproxima bastante a la de los factores iniciales aunque para la velocidad menor $V_c = 6$ m/s y mayor $V_c = 20$ m/s las fuerzas necesarias aumentan unos 14 N por lo que la potencia necesaria será mayor.

Es, para los parámetros $n = 1$ y $m = 2$ para los que se observan mas desviaciones respecto a la curva de JC^0 y la necesidad de aplicar mayores fuerzas para realizar el corte del material para una misma velocidad, la máxima diferencia se observa para $V_c = 12$ m/s que con $n = 1$ se necesitan 384 N y para $m = 2$ hay que aplicar 375 N.

Destacar que para $m = 2$ la fuerza de corte es casi constante, esto puede ser debido a que el aumento de m hace que el material no sea tan sensible a un ablandamiento por aumento de temperatura al aumentar la velocidad de corte. Sin embargo si se aumenta n (curva azul) las fuerzas son mayores (que para JC^0) por que la sensibilidad al endurecimiento por deformación es mayor, aun así si se aumenta la velocidad de corte la temperatura aumenta, se ablanda el material y el factor de endurecimiento se ve contrareestado y por ello la fuerza disminuye.



f) Análisis de la frecuencia de aparición de la banda primaria de cizalladura en los casos del bloque $JC0'$:

La metodología a seguir es la misma que para las simulaciones del bloque JC^0 y JC^I . Al tratarse de los mismos parámetros de *Johnson-Cook* que para el bloque JC^0 , excepto la variación de uno de ellos de forma independiente (C , n ó m), se intentara ver la influencia que esto tienen en la aparición de la banda de cizalladura primaria.

TABLA 4.15. Frecuencias de aparición de la banda de cizalladura para las velocidades del bloque $JC0'$.

Parámetro Variable	Velocidad (m/s)	Frecuencia (KHz)
n=1 $C=0.017$ $m=1.3$	6	15,8
n=1 $C=0.017$ $m=1.3$	12	35,5
n=1 $C=0.017$ $m=1.3$	20	74
m=2 $C=0.017$ $n=0.65$	6	19,5
m=2 $C=0.017$ $n=0.65$	12	36,3
m=2 $C=0.017$ $n=0.65$	20	82,4
C=0.022 $n=0.65$ $m=1.3$	6	21,7
C=0.022 $n=0.65$ $m=1.3$	12	51,4
C=0.022 $n=0.65$ $m=1.3$	20	96,3
JC0	6	19,6
JC0	12	56,6
JC0	20	96,4

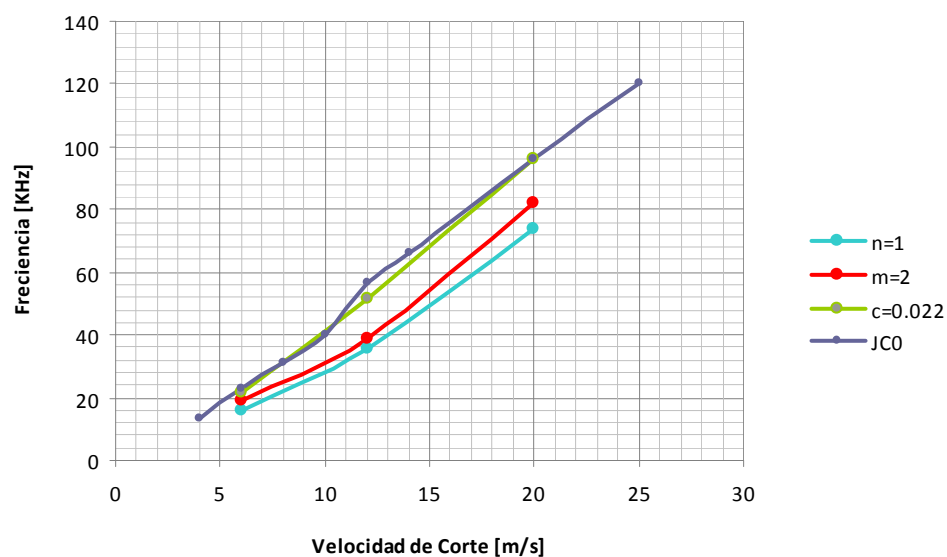


FIGURA 4. 25. Frecuencias en función de la velocidad de corte para los casos del bloque $JC0'$ y comparación con $JC0$.



Los resultados obtenidos se han recogido en la *tabla 4.15*. y se han representado en función de la velocidad de corte en la *figura 4.25*.

Como ya se vio en el análisis para los parámetros de JC^0 , la frecuencia de aparición de la zona primaria de cizalladura aumenta cuando la velocidad de corte crece.

A pesar de esto se observan diferencias que ya se intuían con el estudio de las fuerzas de corte para los diferentes parámetros. Para $C = 0,022$ la curva verde, la variación no es muy grande y las frecuencias son parecidas a JC^0 , sin embargo los factores n y m de nuevo vuelven a ser los que mas afectan a las propiedades del material ya que para ellos, los valores de las frecuencias llegan a disminuir entre unos 15 y 20 KHz, lo que quiere decir que las zonas de deformación localizada tardan mas en aparecer para estos casos.

Esto es debido a que el aumento de ambos factores aumenta la resistencia del material y disminuyen la capacidad de deformación (n aumentando la sensibilidad al endurecimiento por deformación y m disminuyendo la sensibilidad al ablandamiento con el aumento de la temperatura).



g) Análisis local del ancho de la banda de cizalladura en los casos del bloque JC0':

La metodología a seguir es la misma que se describe el *punto 4.d.* para los casos de JC⁰, y los resultados han sido los siguientes:

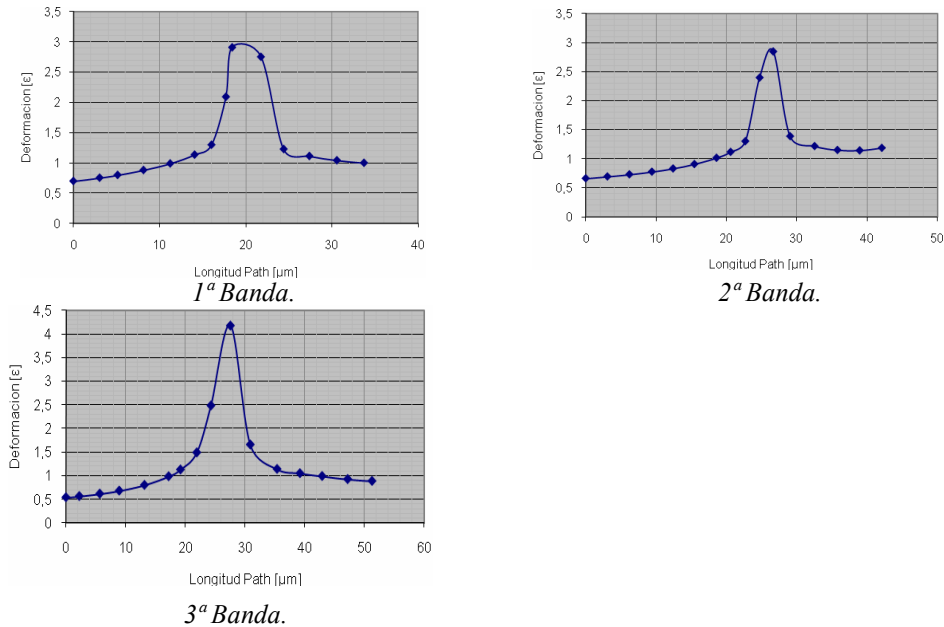


FIGURA 4. 26. Ancho de banda en función de la longitud de estudio para S10: $V_c = 6$ m/s con $C = 0.022$, $n = 0.65$, $m = 1.3$, del bloque JC0'.

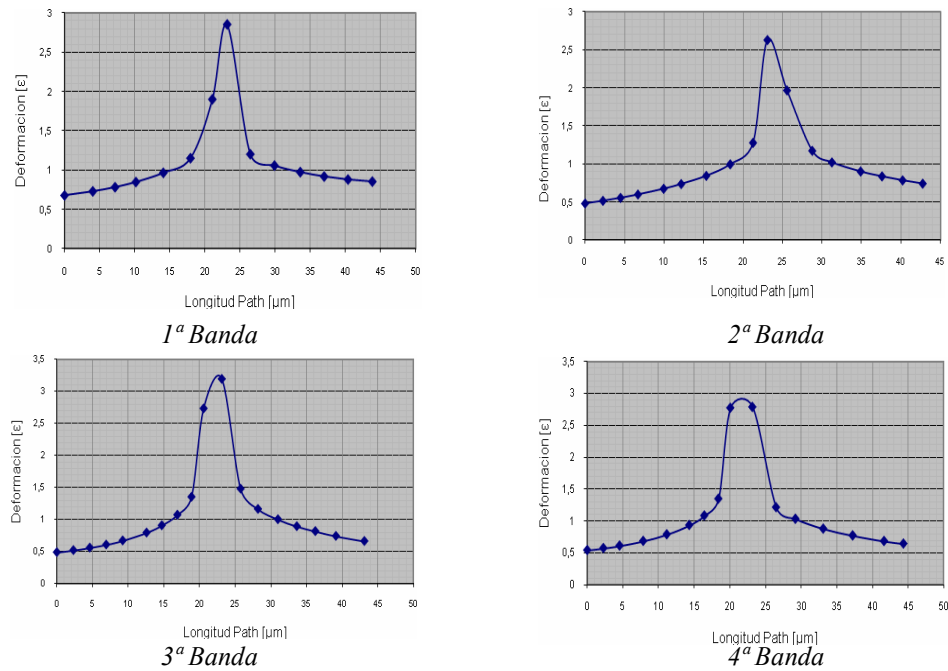


FIGURA 4. 27. Ancho de banda en función de la longitud de estudio para S13: $V_c = 12$ m/s con $C = 0.022$, $n = 0.65$, $m = 1.3$ del bloque JC0'.

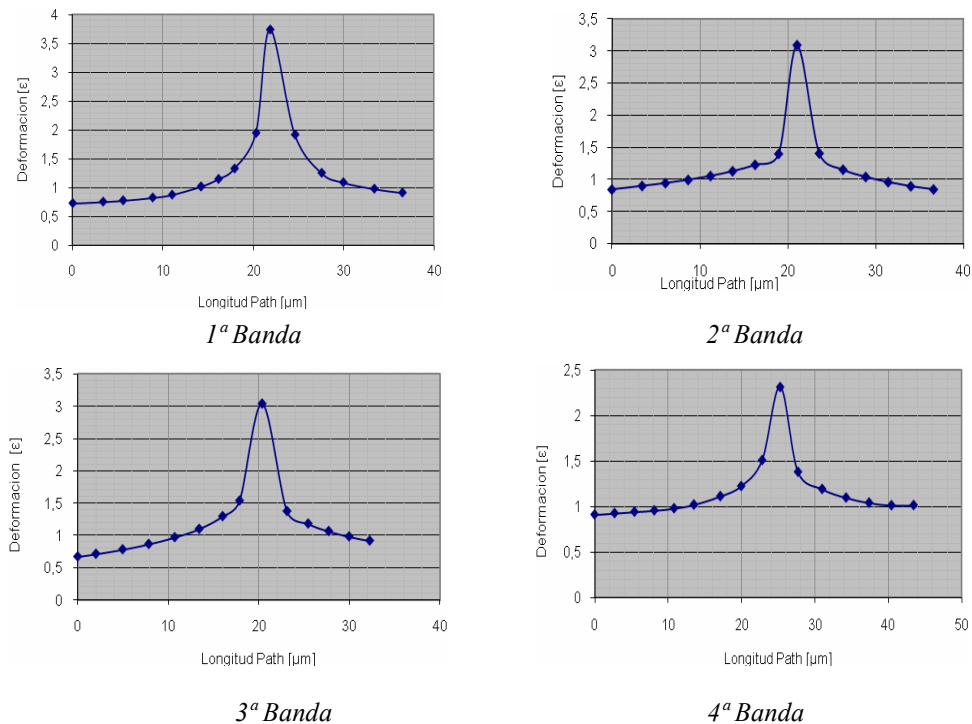


FIGURA 4. 28. Ancho de banda en función de la longitud de estudio para la S18: $V_c = 20$ m/s con $m=2$, $C=0.017$, $n=0.65$ del bloque JC0'.

En las figuras 4.26, .27 y .28 se ven varios ejemplos, para distintos casos, de las graficas que enfrentan el valor de la deformación, en función de la longitud de estudio, de la banda de cizalladura.

TABLA 4. 16. Valores medios aproximados del ancho de banda para todos los casos del bloque JC0'.

Parámetro Variable	Velocidad (m/s)	ω medio (μm)	ω medio sin la primera banda (μm)
n=1 $C=0.017$ $m=1.3$	6	7,38	7,55
n=1 $C=0.017$ $m=1.3$	12	8,99	9,96
n=1 $C=0.017$ $m=1.3$	20	6,11	5,43
m=2 $C=0.017$ $n=0.65$	6	7,4	7,4
m=2 $C=0.017$ $n=0.65$	12	4,63	4,7
m=2 $C=0.017$ $n=0.65$	20	6,68	6,58
C=0.022 $n=0.65$ $m=1.3$	6	7,3	7,26
C=0.022 $n=0.65$ $m=1.3$	12	7,62	7,67
C=0.022 $n=0.65$ $m=1.3$	20	6,22	6,18
JC0	6	8,35	9,03
JC0	12	8,28	9,4
JC0	20	6,35	6,84



En la *tabla 4.16.* se recogen todos los datos de los anchos de banda para cada uno de los casos que se van a comparar.

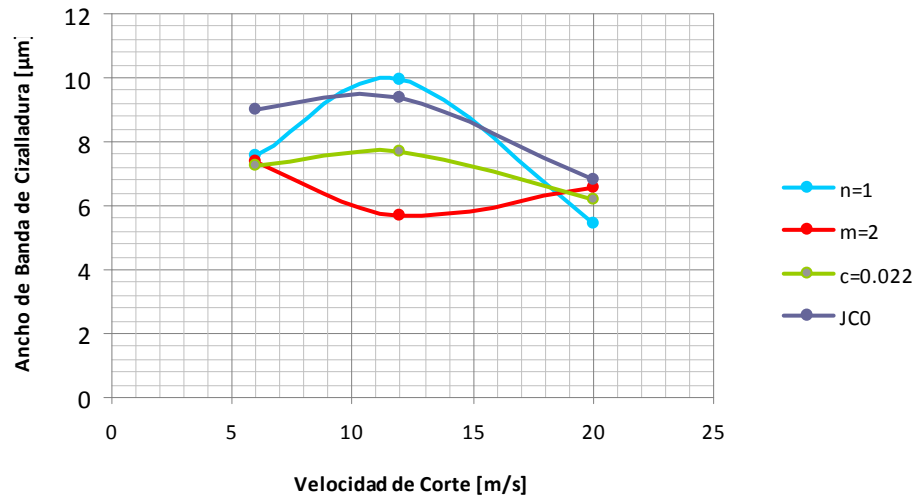


FIGURA 4. 29. Ancho de banda en función de la velocidad de corte para los casos del bloque JC0' y comparación con JC0.

Aunque se varíen los parámetros C , n y m , en este caso aumentándolos, la tendencia del ancho de banda en función de la velocidad de corte sigue siendo bastante aleatoria (*figura 4.29.*) como ocurre con los parámetros de JC^0 . Aun así se pueden considerar unos buenos resultados iniciales a modo de aproximación y se podrán mejorar en futuros trabajos.

h) Estudio de las longitudes de contacto entre viruta y herramienta para las simulaciones del bloque JC^0 y JC^I .

En la interfase entre la viruta y la herramienta de corte, existe una velocidad relativa de deslizamiento del material arrancado respecto a la superficie de desprendimiento de la herramienta. Además de esta velocidad y debido al movimiento de corte aparecerá una presión de contacto entre las dos superficies, esta presión se iniciará en la punta de la herramienta y llegarán a un punto donde se harán cero, limitando así la longitud de contacto que tendrá lugar entre ambas superficies.

A pesar de esto las presiones no se podrán medir al tratarse de un modelo *Lagrangiano* y por ello aparecer discontinuidades en el contacto (*figura 4.30.*). Se medirá la longitud desde la punta de la herramienta hasta el punto donde se observe claramente que termina el contacto (*figura 4.31.*).

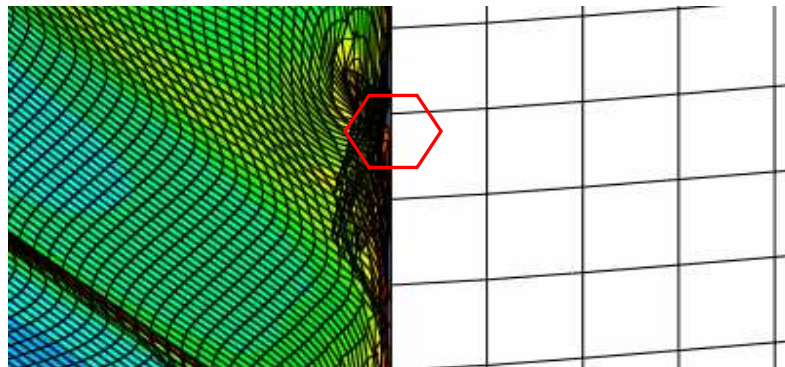


FIGURA 4. 30. Detalle del contacto viruta-herramienta.

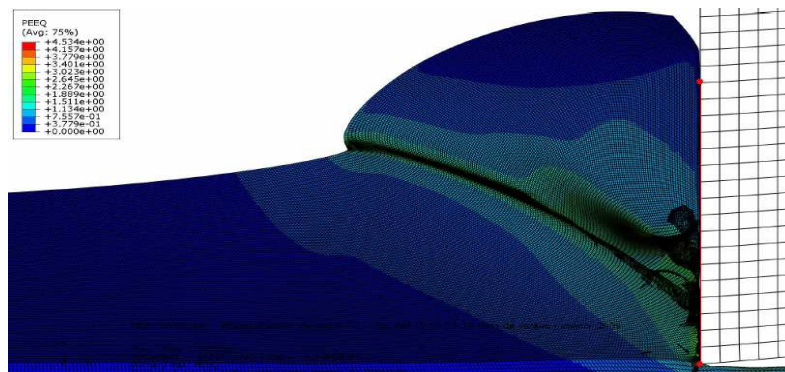


FIGURA 4. 31. Detalle de la longitud de contacto.



Este parámetro tiene su importancia en el proceso de corte, a lo largo de esta longitud será donde la herramienta sufra un *desgaste* importante por rozamiento.

Otro aspecto será la transferencia de calor hacia la herramienta, ya que cuanto mayor sea la longitud de contacto mayor flujo de calor pasara de la viruta a la herramienta en función de la conductividad térmica del material.

El objetivo de este estudio será, ver la influencia de la velocidad de corte sobre la longitud de contacto descrita. Se ha tomado el valor de la longitud en el instante de tiempo en el que aparece la primera banda de cizalladura.

TABLA 4. 17. Longitud de contacto para las $V_c = 4, 6, 10, 20$ m/s del bloque JC^0 .

Velocidad (m/s)	Longitud de Contacto (μm)
4	391.1
6	380.1
10	244.9
20	163.9

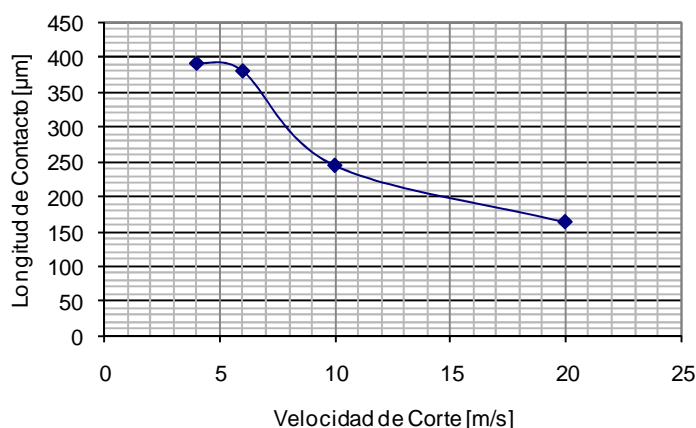


FIGURA 4. 32. Longitud de contacto en función de la velocidad de corte para el bloque JC^0 .

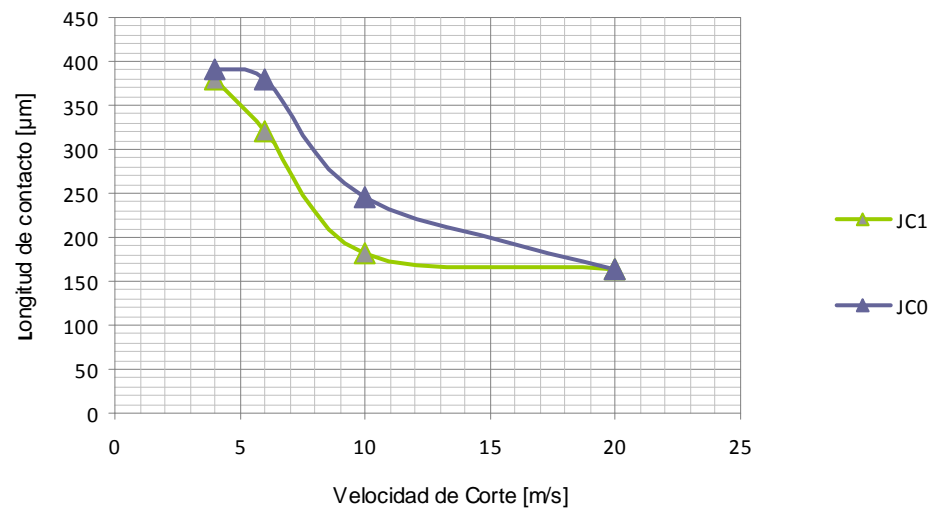
Según los resultados obtenidos, la longitud de contacto para un modelo con los parámetros de JC^0 (figura 4. 32.) disminuye según se aumenta la velocidad de corte.

Variando la velocidad de 4 a 20 m/s, se consigue disminuir la longitud de contacto entre la viruta y la herramienta de 391 μm a 164 μm .

Si se observan los resultados del modelo con los parámetros de JC^I , las conclusiones son prácticamente las mismas. La longitud de contacto disminuye con el aumento de la velocidad de corte, pero en este caso para las mismas velocidades se tienen valores de la longitud ligeramente inferiores (figura 4. 33.).

TABLA 4. 18. Longitud de contacto para las $V_c = 4, 6, 10, 20$ m/s con bloque JC^I .

Velocidad (m/s)	Longitud de Contacto (μm)
4	379,34
6	319,80
10	182,45
20	163,71

FIGURA 4. 33. Comparación de la longitud de contacto en función de la velocidad de corte entre JC^0 y JC^I .

La longitud de contacto se ve por lo tanto influenciada por la velocidad de corte. Si le aplicamos a este material un proceso de corte a velocidades altas se consigue que la longitud de contacto entre la viruta y la herramienta sea menor y por lo tanto la superficie de contacto y de fricción disminuye, aunque la presión ejercida será mayor y mas localizada.

Por otra parte la superficie de intercambio de calor de la viruta a la herramienta también será menor y por lo tanto los gradientes de temperatura en la herramienta serán menores y casi la totalidad del calor será evacuado con la viruta.

i) Análisis de la morfología de la viruta generada durante el corte de para las simulaciones del bloque JC^0 , $JC0'$ y JC^I .

En el análisis de la morfología de la viruta, se intentara observar sobre los resultados de las simulaciones, la influencia de la *velocidad de corte* sobre el material implementado con los parámetros de JC^0 . Otra observación interesante será ver como responde el modelo ante el cambio de los parámetros de JC^0 a JC^I sobre la morfología de la viruta y ver si se aprecian diferencias.

Por ultimo, sobre las simulaciones del bloque $JC0'$ se vera la morfología de la viruta y se comparara con la de JC^0 , con el fin de ver la influencia de los *parámetros* C , n , m , de forma independiente.

Morfología de la viruta en función de la velocidad de corte para JC^0 :

Parámetros de Johnson-Cook iniciales (JC^0):

$$A = 450 \text{ Mpa} \quad B = 1700 \text{ Mpa} \quad C = 0.017 \quad n = 0.65 \quad m = 1.3$$

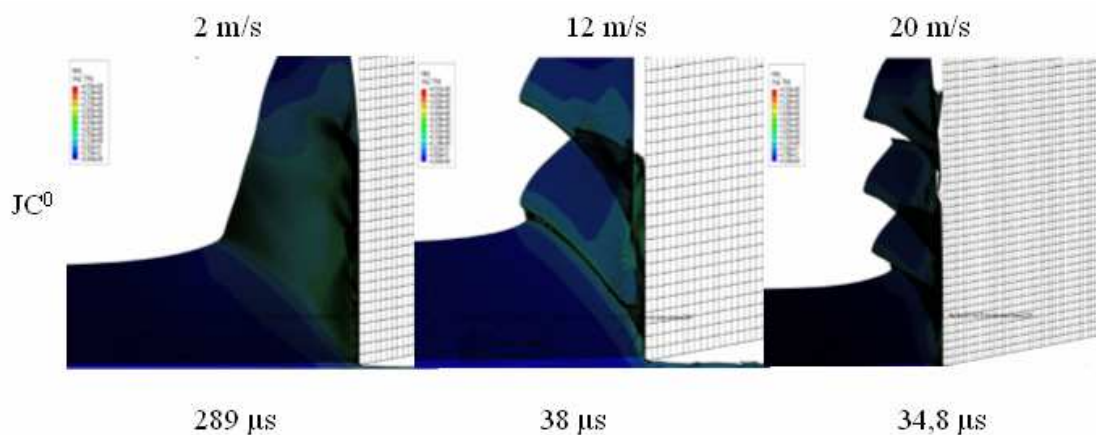


FIGURA 4. 34. Morfología de la viruta para diferentes velocidades e instantes de tiempo del proceso con parámetros de JC^0 .

Con estos parámetros de JC^0 , se observa un cambio de morfología radical según se aumenta la velocidad de corte del proceso. Viendo la *figura 4.34.*, para la $V_c = 2 \text{ m/s}$ a los $289 \mu\text{s}$ la viruta que se observa es totalmente continua, mientras que para velocidades mayores 12 y 20 m/s se localizan zonas de cizalladura primarias y una clara segmentación y discontinuidad de la viruta, siendo para 20 m/s de mayor grado.

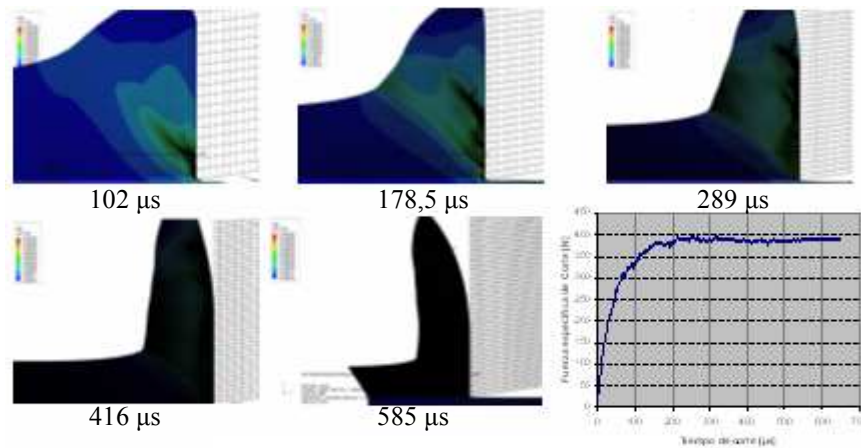


FIGURA 4. 35. Morfología de la viruta para diferentes instantes de tiempo durante el mismo proceso a $V_c = 2 \text{ m/s}$ y parámetros JC^0 .

Mención especial a la morfología de la viruta para la velocidad de corte de 2 m/s con los parámetros de JC^0 , en la figura 4.35. se observan diferentes instantes del corte y se ve como llegando al final de la longitud de la pieza, la viruta sigue siendo *continua* y no hay indicios de segmentación.

Sobre los primeros instantes del corte se ve como las mayores localizaciones de la deformación se generan en la zona 2ª (interfase viruta-herramienta).

Todo esto tiene una clara influencia en la fuerza de corte que como se ve en la figura 4.35., es totalmente constante una vez que se estabiliza el proceso. El motivo de este fenómeno es la ausencia de segmentación y por lo tanto la fuerza a aplicar es constante al no desprenderse material y no perder contacto con la herramienta.

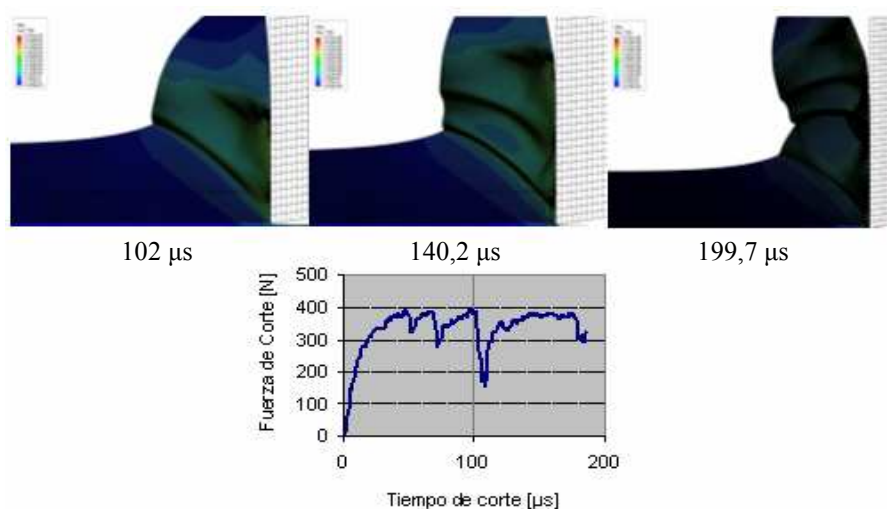


FIGURA 4. 36. Morfología de la viruta para diferentes instantes de tiempo durante el mismo proceso a $V_c = 4 \text{ m/s}$ y parámetros JC^0 .

Para la $V_c = 4$ m/s la *segmentación* es clara como se puede observar en la *figura 4.36.* . La aparición de esta morfología de la viruta se ve reflejada en la forma de la fuerza de corte en función del tiempo, donde aparecen picos de fuerza que se repiten con cierta frecuencia, el motivo es que cuando aparece una zona de cizalladura la viruta ejerce una menor resistencia a la herramienta y la fuerza para desplazarla disminuye volviendo a aumentar para seguir arrancado material.

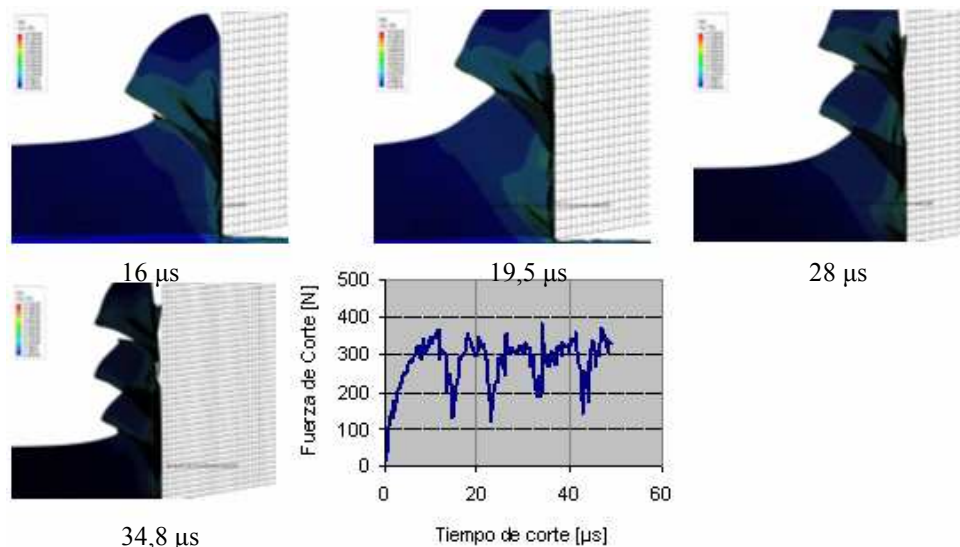


FIGURA 4. 36. Morfología de la viruta para diferentes instantes de tiempo durante el mismo proceso a $V_c = 20$ m/s y parámetros JC^0 .

Si se continua aumentando la velocidad de corte a $V_c = 20$ m/s (*figura 4.36.*) la viruta pasa de ser segmentada a ser discontinua y se desprenden trozos del material. Para este caso el fenómeno de fluctuación de las fueras de corte es mas severo y la herramienta sufrirá un traqueteo mucho mayor.

Morfología de la viruta en función de la velocidad de corte para JC^I :

Parámetros de Johnson-Cook (JC^I):

$A = 400 \text{ Mpa}$ $B = 1798 \text{ Mpa}$ $C = 0.0312$ $n = 0.9143$ $m = 1.03$

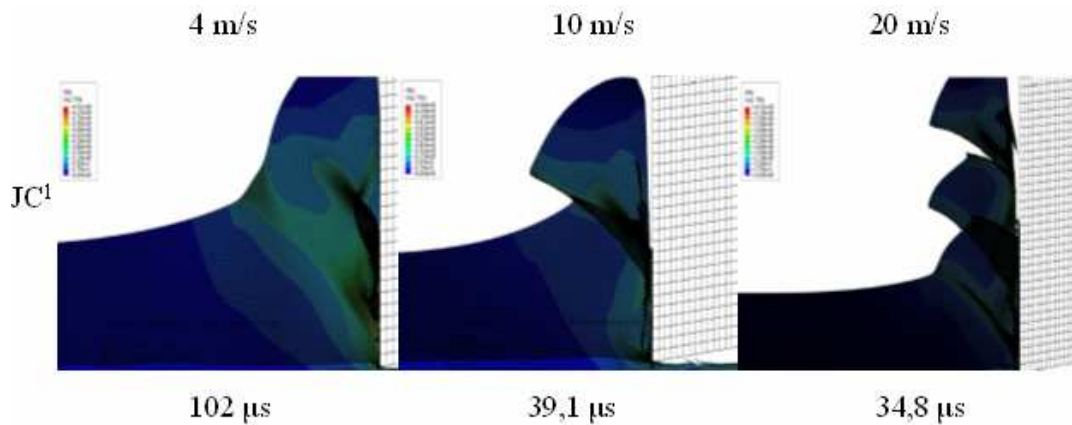


FIGURA 4. 37. Morfología de la viruta para diferentes velocidades e instantes de tiempo del proceso con parámetros de JC^I .

Los resultados para estos parámetros de JC^I son muy semejantes (figura 4.37.), una mayor segmentación a medida que la velocidad de corte aumenta, por lo tanto hay indicios de que esta tendencia con la velocidad de corte sea común para cualquier conjunto de parámetros de *Johnson-Cook*.

Comparación de la viruta generada con cada conjunto de parámetros, JC^0 y JC^I :

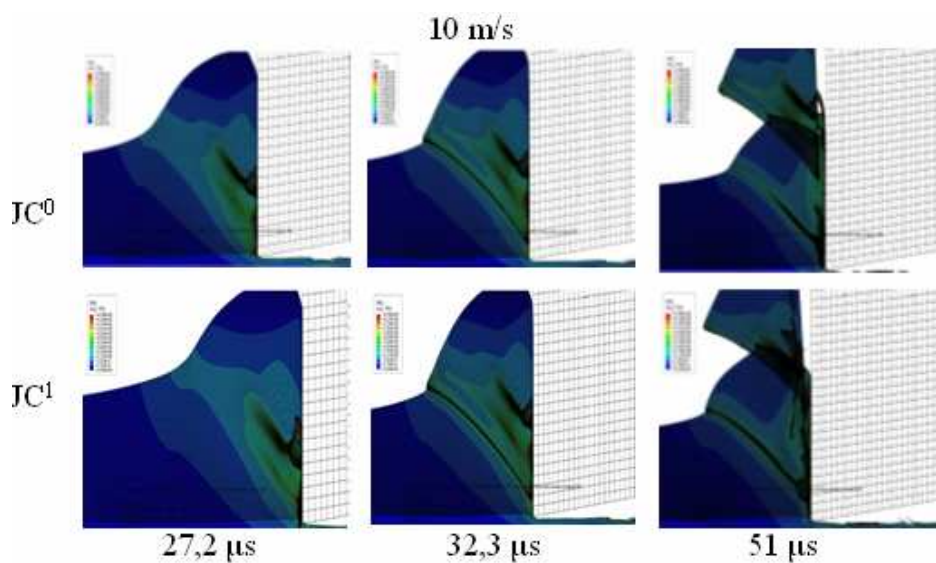


FIGURA 4. 38. Comparación de la morfología de la viruta para diferentes instantes de tiempo durante el proceso a $V_c = 10 \text{ m/s}$ y parámetros JC^0 y JC^I .

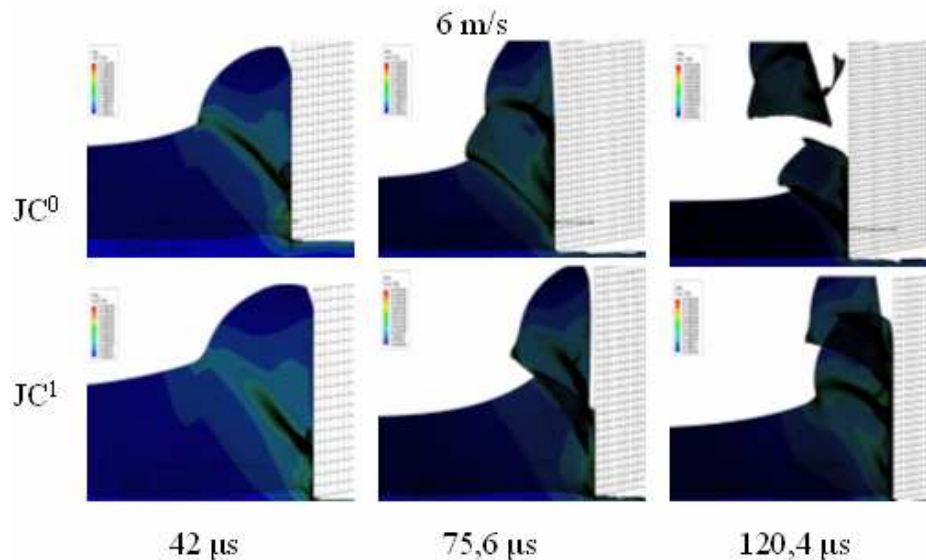


FIGURA 4. 39. Comparación de la morfología de la viruta para diferentes instantes de tiempo durante el proceso a $V_c = 6 \text{ m/s}$ y parámetros JC^0 y JC^I .

En las figuras 4.38. y 4.39. se observa como el modelo, en lo que respecta a la morfología de la viruta, genera cambios aparentes en los resultados de las simulaciones, cuando se varían las propiedades del material.

Con los parámetros de JC^0 y una $V_c = 10 \text{ m/s}$ se ve un inicio de la segmentación de la viruta al igual que para los parámetros de JC^I , aunque para estos últimos la segmentación o la banda de cizalladura a los $51 \mu\text{s}$ se genera antes. Para una velocidad menor $V_c = 6 \text{ m/s}$ ocurre lo mismo pero la diferencia es mas apreciable, inicialmente la morfología es muy parecida pero a los $75,6 \mu\text{s}$ para los parámetros de JC^I la viruta ya ha roto antes que para JC^0 . Si se sigue observando el proceso de corte, a los $120,4 \mu\text{s}$ para el caso de JC^I se ha generado una segunda banda de cizalladura pero sin llegar a producirse una discontinuidad, cosa que para JC^0 si ocurre.

Las diferencias en la morfología existen pero no se puede definir una tendencia clara para alguno de los dos conjuntos de parámetros de *Johnson-Cook*.

Parámetros de Johnson-Cook (JC^I):

$$A = 400 \text{ Mpa} \quad B = 1798 \text{ Mpa} \quad C = 0.0312 \quad n = 0.9143 \quad m = 1.03$$

Parámetros de Johnson-Cook iniciales (JC^0):

$$A = 450 \text{ Mpa} \quad B = 1700 \text{ Mpa} \quad C = 0.017 \quad n = 0.65 \quad m = 1.3$$



Si se observan los parámetros en ambos casos, se puede ver como unos disminuyen y otros elevan su valor. El límite elástico para JC^I es menor que para JC^0 lo que le dará mayor elasticidad al material para JC^0 que no beneficiara la aparición de deformación plástica. El conjunto de parámetros que regulan el endurecimiento por deformación B y n son mayores en JC^I que en JC^0 , por lo tanto el material definido con JC^I se endurecerá mas cuanto mayor sea la deformación. El parámetro C que es mayor para JC^I hará que cueste mas deformar el material en este caso. En cuanto al ablandamiento con la temperatura será mayor para JC^I al tener el parámetro m más pequeño.

Todo esto hace que el comportamiento del material y por lo tanto la segmentación de la viruta sea una *competición* entre los distintos factores. En unos casos serán más favorables los parámetros de JC^I y en otros JC^0 .

Este puede ser el motivo por el cual las diferencias en la morfología de la viruta para $V_c = 10$ m/s apenas sean apreciables (*figura 4.38.*), mientras que para $V_c = 6$ m/s si se observen cambios pero tampoco una tendencia clara (*figura 4.39.*).

Al no llegar a unas conclusiones firmes sobre la influencia de los parámetros C , n y m al variarlos de forma conjunta, se procederá al siguiente estudio.

Influencia de los parámetros C , n y m de Johnson-Cook en la morfología de la viruta:

Sobre el modelo con los parámetros de JC^0 , se han introducido variaciones que ya han sido comentadas anteriormente. Con estos cambios se compararan los resultados de la morfología de la viruta que se obtienen con los iniciales.

El objetivo es ver como responde el modelo ante estas variaciones y por consiguiente en la morfología de la viruta.

La variación de los parámetros será independiente:

Parámetros de Johnson-Cook iniciales (JC^0):

$$A= 450 \text{ Mpa} \quad B= 1700 \text{ Mpa} \quad C=0.017 \quad n=0.65 \quad m=1.3$$

De $n = 0,65$ a $n = 1$
 De $m = 1,3$ a $m = 2$
 De $C = 0,017$ a $C = 0,022$

Influencia del parámetro n :

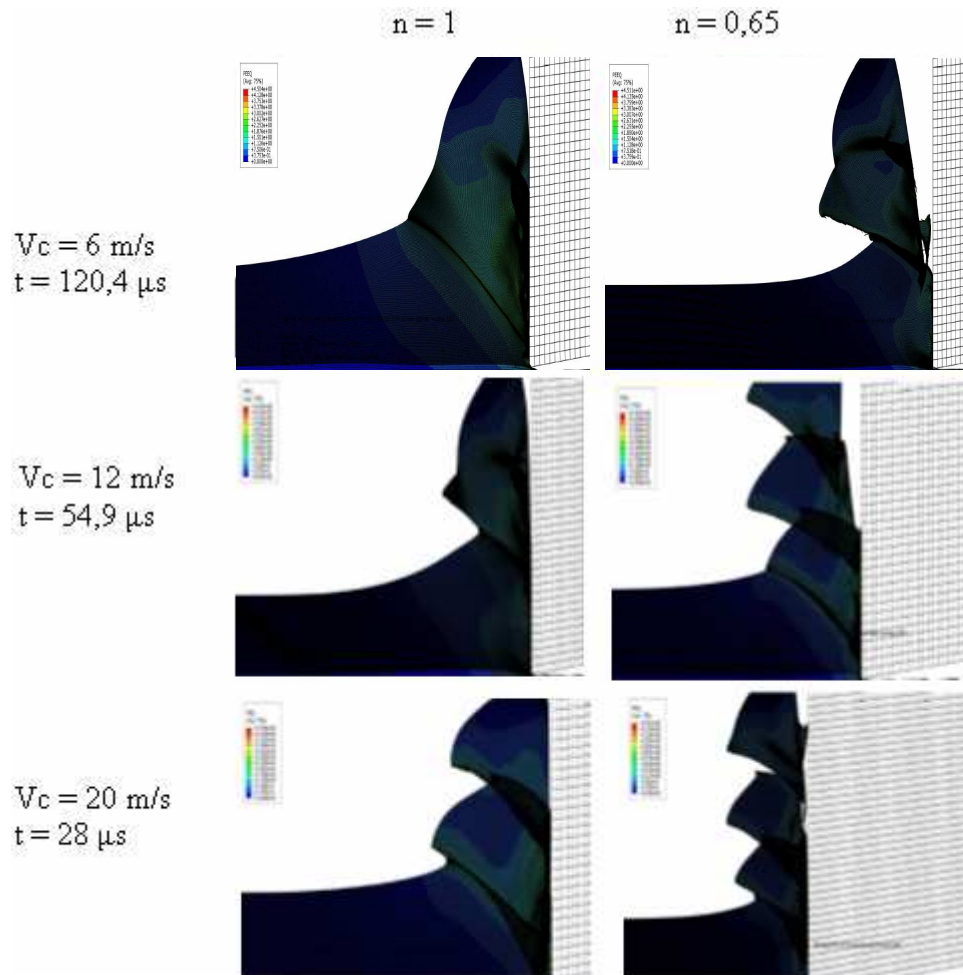


FIGURA 4. 40. Comparación de la morfología de la viruta al variar el parámetro n , para diferentes velocidades de corte.

Un aumento del parámetro n eleva la sensibilidad del material al endurecimiento por deformación, es decir cuanto mas deformación sufre mas se endurece localmente en la zona de cizalladura. Esto afecta a la morfología de la viruta ya que cuesta mas llegar a una deformación critica de rotura y por ello la segmentación es menor (figura 4.39.).

Por lo tanto si se quiere obtener una mayor segmentación en el proceso de corte con el fin de conseguir una mejor evacuación de la viruta, es importante controlar el parámetro n , variando las propiedades del material.



Influencia del parámetro m :

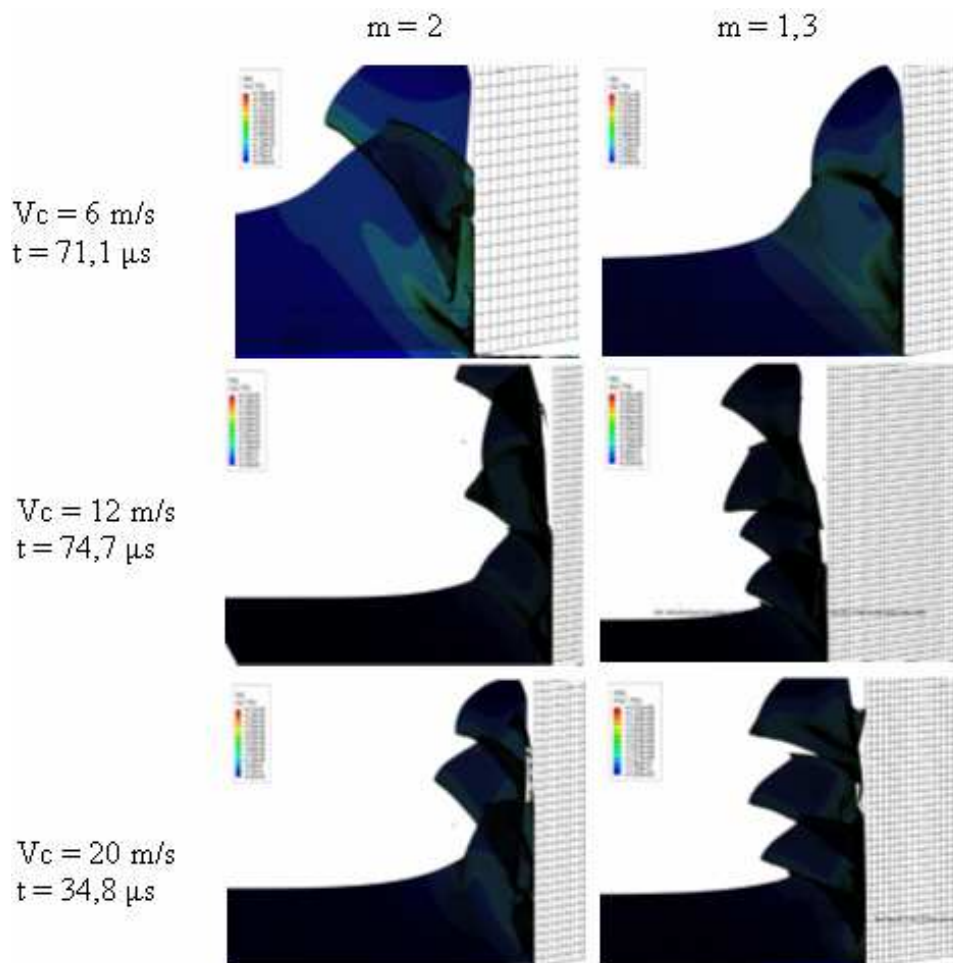


FIGURA 4. 41. Comparación de la morfología de la viruta al variar el parámetro m , para diferentes velocidades de corte.

Para velocidades grandes donde las temperaturas en la zona de corte son mayores, el parámetro m se hace mas fuerte dentro de la ecuación que rige el comportamiento del material, disminuyendo su valor, el material baja su resistencia porque se ablanda mas con el aumento de la temperatura y esto tiene un efecto, que no es otro, que una mayor segmentación y discontinuidad en la viruta (*figura 4.40.*), que es mas notable cuanto mayor es la velocidad de corte.

Influencia del parámetro C :

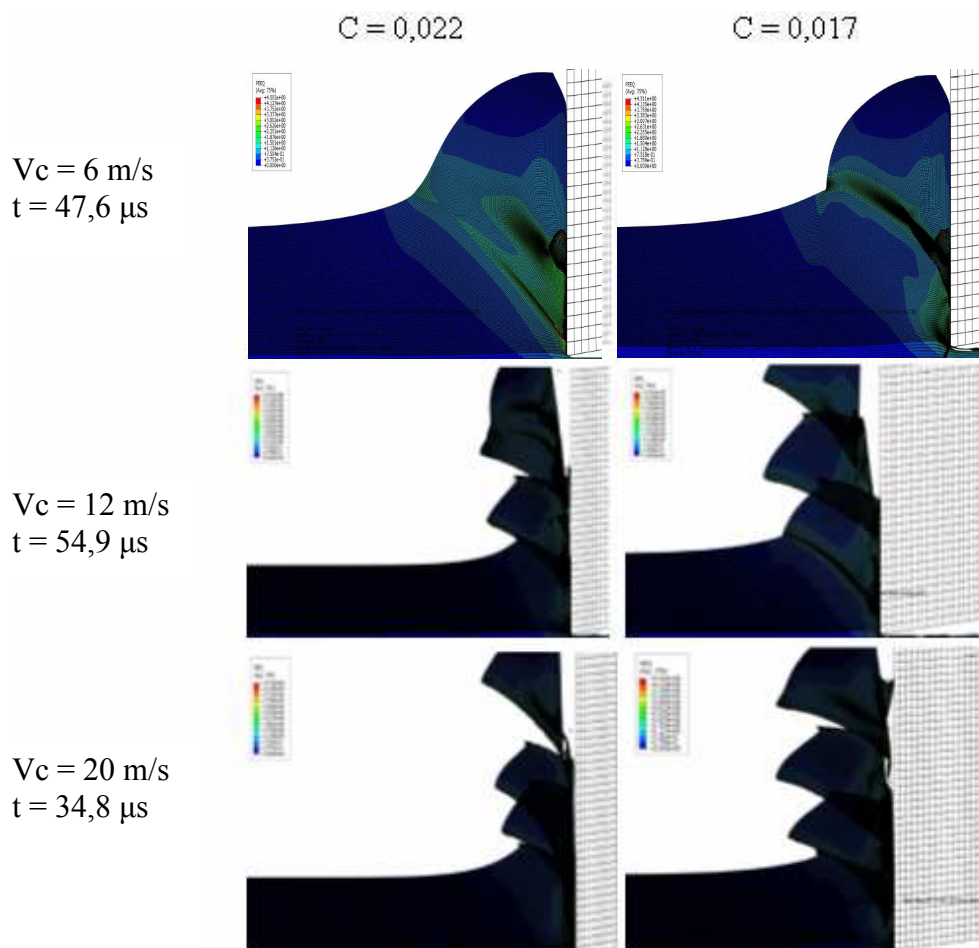


FIGURA 4.42. Comparación de la morfología de la viruta al variar el parámetro C , para diferentes velocidades de corte.

El parámetro C mide la sensibilidad del material ante una variación de la velocidad de deformación. En este caso el parámetro C ha aumentado de 0,017 a 0,022 lo que hará endurecer al material y costará mas deformar, segmentar o romper la viruta. En la *figura 4.42*. se observan los resultados de la morfología de la viruta variando el parámetro C para distintas velocidades en aumento. La segmentación es ligeramente mayor para las simulaciones realizadas con $C = 0,017$, las diferencias no son muy grandes posiblemente debido a que el incremento de C tampoco lo es. Además la sensibilidad al aumento de la velocidad de deformación aumenta con la velocidad de corte pero se enfrenta directamente con el de ablandamiento del material por incremento de la temperatura, que también ocurre a velocidades altas.



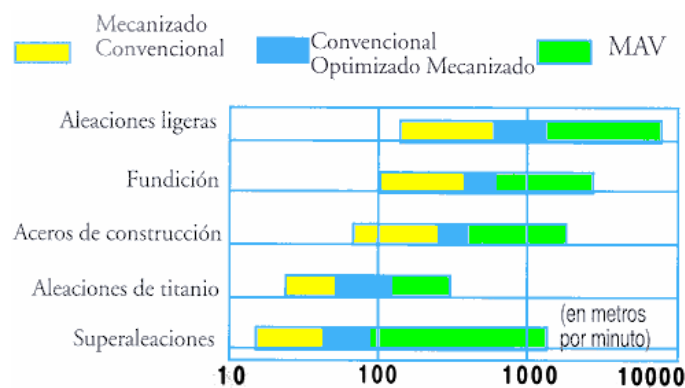
5. CONCLUSIONES.

En este trabajo el propósito era lograr un conocimiento mayor del proceso, que ayude en la correcta definición de los parámetros de corte y en la mejora del diseño de las herramientas y maquinaria para el mecanizado óptimo del INCONEL 718.

Para ello se ha utilizado un *modelo* de simulación mediante elementos finitos que ha ayudado a llegar a las siguientes conclusiones, sin necesidad de realizar procesos de corte reales, con su consecuente gasto económico.

Si se varían los porcentajes de composición de los distintos elementos que forma la aleación INCONEL 718, o incluso sometiéndolo a tratamientos térmicos, se pueden variar sus propiedades mecánicas, variando así su comportamiento en el corte. Es eso lo que se ha intentado simular en este proyecto variando los parámetros C , n , m de la ecuación que rige el comportamiento del material.

Esto y la aplicación del *mecanizado a altas velocidades de corte* (de 5 a 10 veces más rápido que la velocidad de corte convencional), sobre el modelo numérico, ha dado lugar a las siguientes conclusiones.



La respuesta de la aleación INCONEL 718 implementada en el modelo, con los parámetros iniciales de *Johnson-Cook* (JC^0), respecto a un aumento de la *velocidad de corte*, se resume de la siguiente forma:

Parámetros de Johnson-Cook iniciales (JC^0):

$$A= 450 \text{ MPa} \quad B= 1700 \text{ MPa} \quad C=0.017 \quad n=0.65 \quad m=1.3$$



- Cuanto mayor es la velocidad de corte que se aplica para mecanizar el material, menores son las *fuerzas de corte* y de *avance* necesarias.
- La *frecuencia* de aparición de la banda primaria de cizalladura es mayor cuanto mayor sea la velocidad de corte. Se observa como la tendencia, que no los valores, de la frecuencia en el TITANIO es prácticamente idéntica a la del INCONEL 718. Por lo tanto teniendo como referencia los resultados para el TITANIO^[25] se puede decir que el modelo utilizado para simular el INCONEL 718 es bastante bueno para calcular este parámetro.
- Tanto el método como el modelo utilizado para calcular el *ancho de banda de cizalladura* no son óptimos ya que los resultados son bastante aleatorios. Si pueden servir como una primera aproximación, pero pueden ser mejorados.
- Observando la *longitud de contacto* medida entre la viruta y la herramienta, la tendencia es que esta disminuya con velocidades de corte altas.
- En cuanto a la *morfología de la viruta*, la variación de esta, con el aumento de la velocidad de corte es de continua a segmentada, incluso discontinua si la velocidad de corte llega a valores como 20 o 25 m/s.

TABLA 5.1. Tendencia de las variables dependientes al aplicar mecanizado a alta velocidad.

Variable dependiente	Influencia del Mecanizado a alta velocidad (MAV)
Fuerzas de corte	Disminuyen a velocidades altas
Frecuencia de la banda de cizalladura	Aumenta a velocidades altas
Long. Contacto (viruta-herramienta)	Menor a altas velocidades
Morfología de la viruta	Mayor segmentación incluso discontinuidad a velocidades altas
Ancho de banda	Los resultados se pueden mejorar con un modelo más fino y un método más exacto. Los resultados iniciales tienden a disminuir con la Vc



La variación de los parámetros de JC^0 a JC^I sobre el modelo, ha hecho que este de resultados parecidos pero con ciertas diferencias. Indica que el modelo utilizado responde de forma óptima al aplicarle diferentes propiedades al material.

Parámetros de Johnson-Cook (JC^I):

$$A= 400 \text{ MPa} \quad B= 1798 \text{ MPa} \quad C=0.0312 \quad n=0.9143 \quad m=1.03$$

- La tendencia a que disminuyan las *fuerzas de corte* cuando aumenta la velocidad sigue presente, pero para el caso de JC^I las fuerzas para una misma velocidad son mayores, lo que indica que el material con estos parámetros se opone mas al corte (endurece), y además es necesaria una *mayor potencia* para ello, que con los parámetros de JC^0 .
- Las *frecuencias* de aparición de la banda de cizalladura primaria también aumentan con el aumento de la velocidad de corte, pero para los parámetros de JC^I las frecuencias para las mismas velocidades (4, 6, 10 y 20 m/s) son menores que con los parámetros de JC^0 .
- En cuanto a la *longitud de contacto* viruta-herramienta, si se observan los resultados del modelo con los parámetros de JC^I , las conclusiones respecto a la velocidad son prácticamente las mismas. La longitud de contacto disminuye con el aumento de la velocidad de corte, pero en este caso para las mismas velocidades se tienen valores de la longitud ligeramente inferiores que para JC^0 .
- La viruta también se segmenta y rompe con velocidades de corte altas para los parámetros de JC^I . Para las mismas condiciones de corte existen diferencias en la *morfología* respecto a JC^0 , pero estas son pequeñas, y no son clarividentes para definir una tendencia para cada grupo de parámetros de *Johnson-Cook*.



TABLA 5.2. Tendencia de las variables dependientes al variar las propiedades del material.

Variable dependiente	JC^0 A= 450 B= 1700 C=0.017 n=0.65 m=1.3	JC^I A= 400 B= 1798 C=0.0312 n=0.9143 m=1.03
Fuerzas de corte	Disminuyen	Aumentan
Frecuencia de la banda de cizalladura	Aumenta	Disminuye
Long. Contacto (viruta-herramienta)	Mayor contacto	Menor contacto
Morfología de la viruta	Segmentación y discontinuidad con Vc altas	Segmentación y discontinuidad con Vc altas
La morfología es bastante similar para ambos grupos de parámetros: existe un enfrentamiento entre los factores C , n y m de la ecuación de <i>Johnson-Cook</i> .		

La influencia de los parámetros C , n y m , al variarlos de forma conjunta no ha permitido sacar conclusiones claras sobre todo para la morfología de la viruta, por ello se realizó el estudio variando dichos parámetros de forma independiente para las velocidades de 6, 12 y 20 m/s.

Parámetros de Johnson-Cook iniciales (JC^0):

$$A= 450 \text{ Mpa} \quad B= 1700 \text{ Mpa} \quad C=0.017 \quad n=0.65 \quad m=1.3$$

$$\text{De } n = 0,65 \text{ a } n = 1$$

$$\text{De } m = 1,3 \text{ a } m = 2$$

$$\text{De } C = 0,017 \text{ a } C = 0,022$$

- Los parámetros n y C , aumentan respecto a los iniciales por lo tanto el material es más sensible al endurecimiento por deformación y a la velocidad de deformación, y para ambos casos endurece. Por esta razón las *fuerzas de corte* necesarias aumentan respecto a los parámetros iniciales JC^0 , aunque siguen disminuyendo si se aumenta la velocidad de corte.

Destacar que el parámetro C es el que menos hace variar los resultados respecto a los iniciales.

El parámetro m también aumenta y esto hará que el material se ablande menos con un aumento de la temperatura. Los resultados obtenidos reflejan este efecto y por ello las *fuerzas de corte* necesarias son mayores que para JC^0 .



- Cuando los parámetros C , n y m , se aumentan de manera independiente, influyen bajando la *frecuencia* de aparición de la banda de cizalladura respecto a los de JC^0 . El parámetro C no afecta demasiado y sus resultados no se alejan de los conseguidos con su valor inicial.
- Aumentando los valores de n , m y C , los resultados para el ancho de banda tampoco son óptimos, y no se pueden considerar definitivos aunque sí como unos valores iniciales que se pueden mejorar.
- Sobre la morfología de la viruta, un aumento de los parámetros n y m , supone una menor segmentación de la viruta para todo el rango de velocidades de corte respecto a los resultados obtenidos con JC^0 , el aumento de estos parámetros favorece la resistencia del material.
Para el parámetro C , el resultado es el mismo, una menor segmentación cuando su valor aumenta, pero en este caso la diferencia de morfología respecto a JC^0 no es tan notable.

TABLA 5.3. Tendencia de las variables dependientes al variar por separado los parámetros de Johnson-Cook.

Variable dependiente	Aumentado n	Aumentado m	Aumentado C
Fuerzas de corte	Aumentan	Aumentan	Aumentan
Frecuencia de la banda de cizalladura	Aumentan	Aumentan	Aumentan
Ancho de Banda	Se obtienen unos resultados iniciales bastante aleatorios con los que no se puede llegar a ninguna conclusión definitiva. Los resultados son mejorables.		
Morfología de la viruta	Menor segmentación	Menor segmentación	Menor segmentación. Se podría ver mejor con una mayor variación del parámetro C .



Los resultados obtenidos se aproximan bastante a las pautas que recoge la teoría del corte ortogonal (*punto 1.2.a.*), la teoría sobre el mecanismo de formación de la viruta (*punto 1.3.*), y del mecanizado por alta velocidad.

TABLA 5.4. Relación de los resultados obtenidos con la teoría del mecanizado a alta velocidad de corte.

Teoría del MAV	Resultados obtenidos
Se reducen las fuerzas de corte como consecuencia del reblandecimiento del material mecanizado.	Las fuerzas de corte disminuyen con la velocidad de corte para todos los casos.
El coeficiente de rozamiento viruta-herramienta disminuye.	Disminuyen la fuerzas de rozamiento = Fuerzas de avance.
Desaparece el filo recrecido con una mejora sustancial del acabado superficial.	No se aprecia filo recrecido.
Casi toda la totalidad del calor es evacuado con la viruta.	La longitud de contacto viruta-herramienta disminuye con el aumento de la velocidad de corte. Menor superficie para el intercambio de calor.
Aplicado al mecanizado por Control Numérico (CNC)	Mayor segmentación y discontinuad de la viruta cuando aumenta la velocidad. Mejor evacuación de la misma, optimo para CNC.

Con esto se puede decir que el método de elementos finitos (MEF) y en concreto el *modelo* utilizado en la realización del proyecto, son una herramienta de aproximación al proceso de mecanizado del material INCONEL 718 bastante buena, sobre todo para observar como varían parámetros como: fuerzas de corte y de avance, frecuencias de aparición de la banda de cizalladura y morfología de la viruta. El análisis del ancho de banda de cizalladura queda como una aproximación inicial, con unos resultados que se pueden mejorar.



6. TRABAJOS FUTUROS.

Los resultados para el *ancho de banda de cizalladura* no son los deseados, no sirven para describir una tendencia o llegar a una conclusión final.

Por ello una opción sería mejorar el modelo utilizado, haciendo el mallado, sobre todo en la zona de la viruta sea más fino y la longitud a mecanizar más pequeña. Con esto realizar unas nuevas simulaciones y observar si los resultados para el *ancho de banda de cizalladura* son más claros.

Una vez visto que el modelo responde bastante bien y es optimo para simular el proceso de mecanizado del INCONEL 718, sería bueno aplicarlo implementado las propiedades de otros materiales.

Repetir las simulaciones, variando parámetros como, la geometría de la herramienta con ángulos de desprendimiento mayores o aumentando el avance de la herramienta, incluso variando el ángulo de incidencia.

Respecto a los parámetros de *Johnson-Cook* C , n y m , en este trabajo han sido modificados de forma independiente aumentando su valor. Sería interesante ver como varían los resultados aumentando mas su valor (en concreto C) o incluso disminuyéndolos.

Sobre este mismo modelo también se podrían hacer simulaciones y estudiar otras variables dependientes como, los gradientes de temperatura en las zonas principales del corte o la fricción (μ) en la interfase viruta-herramienta.



7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS Y DOCUMENTACION.

- [1] Miguèlez Garrido, H., Canteli Fernández, J.A., Cantero Guisandez, J.L. (Curso 2005-2006). *Apuntes de Tecnología Mecánica (Ing. Tec. Industrial: Mecánica)*. Madrid: Universidad Carlos III.
- [2] Dr. Martin Bäker. (2004). *Finite Element Simulation of Chip Formation*. Braunschweig.
- [3] Miguelez Garrido, H., Canteli Fernández, J.A., Cantero Guisandez, J.L., et al. (2005). *Problemas Resueltos de Tecnología de Fabricación*. Madrid: Thomson Editores España.
- [4] Broton Sánchez, J.C. Pérez Vidal, C. (Curso 2007-2008). *Apuntes de Ing. De Sistemas y Automática, Tecnología de Fabricación y Tecnología de Maquinas (Ing. Industrial): “Formación de la viruta”, “Procesos de Mecanizado”, “Conformado por arranque de Material”*. Elche: Universidad Miguel Hernández.
- [5] Espinosa Escudero, M^a del Mar. (2000). *Introducción a los procesos de fabricación*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- [6] Hoppe, S. Asesorado por: Univ.-Prof.Dr.Ing; Klocke, F., Tönshoff, H. K. (2003). *Experimental and numerical analysis of chip formation in metal cutting*. Tesis por la Facultad de Ingeniería Mecánica; Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule.
- [7] Fernández, D. Dirigido por: Zaera Polo, R. (2007). *Desarrollo de una nueva herramienta basada en redes neuronales para el diseño de protecciones ligeras cerámica-metal frente a impacto de alta velocidad*. Tesis por la Universidad Carlos III, Departamento de Mecánica y Medios continuos. Leganes, Madrid.
- [8] Asad, M., Mabrouki, T., Frigal, J. (2-4 April, 2008). *Prediction of chip morphology during milling of an aeronautic aluminium alloy (A2024-T351)*. 13th session MANUFACTURING 21, Laboratory off contact mechanics and structures (LaMCoS) INSA. Lyon.



- [9] Viharos, Zs.J., Markos, S., Szekres, Cs. (22-27 Junio, 2003). *ANN-based chip-form classification in turning*. XVII IMEKO World Congress. Dubrovnik, Croatia, pp. 1469-1473.

- [10] Kountanya, R., Al-Zkeri, I., Altan, T. (2009). Effect of tool Edge geometry and cutting conditions on experimental and simulated chip morphology in orthogonal hard turning of 100Cr6 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 209, pp. 5068-5076.

- [11] Davies, M.A., Chou, Y., Evans, C.J. (1996). On Chip Morphology, Tool Wear and Cutting Mechanics in Finish Hard Turning. *National Institute of Standards and Technology*. Gaithersburg, USA.

- [12] Hubert W. Meyer., David S. Kleponis. (2001). An Analysis of Parameters for the Johnson-Cook Strength Model for 2-in-Thick Rolled Homogeneous Armor. *Army Research Laboratory*. USA.

- [13] R.S. Pawade., Harshad A. Sonawane., Suhas S. Joshi. (2009). An analytical model to predict specific shear energy in high-speed turning of Inconel 718. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Mechanical Engineering Department, Indian Institute of Technology Bombay. India. D 50

- [14] Davies, M.A., Chou, Y., Evans, C.J. (1996). On Chip Morphology, Tool Wear and Cutting Mechanics in Finish Hard Turning. *National Institute of Standards and Technology*. Gaithersburg, USA.

- [15] T. Kobayashi., J.W. Simons., C.S. Brown., D.A. Shockey. (2008). Plastic flow behavior of Inconel 718 under dynamic shear loads. *International Journal of Impact Engineering*, Volume 35, pp. 389–396.

- [16] E. Uhlmann., M. Graf von der Schulenburg., R. Zettler. (nd). Finite Element Modeling and Cutting Simulation of Inconel 718. *Institute for Machine Tools and Factory Management*, Technische Universität Berlin, Alemania.



- [17] J. Michael Pereira., Bradley A. Lerch. (2001). Effects of heat treatment on the ballistic impact properties of Inconel 718 for jet engine fan containment applications. *International Journal of Impact Engineering*, Volume 25, pp.715–733.
- [18] V. Sánchez Gálvez. (2008). Tenacidad de Fractura Dinámica. *Anales de Mecánica de la Fractura 25, Vol. 1*. Departamento de Ciencia de Materiales, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, España.
- [19] A.K. Balaji., R. Ghosh., X.D. Fang., R. Stevenson., I.S. Jawahir. (2006). Manufacturing Engineering Research Digest. Series Performance-Based Predictive Models and Optimization Methods for Turning Operations and Applications: Part 2-Assessment of Chip Forms/Chip Breakability. *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 8, Nº 2.
- [20] Kalpakjian, Schmid. *Fundamentals of Cutting*. (2001). Manufacturing Engineering and Technology. Editorial: Prentice-Hall.
ftp://ftp.prenhall.com/pub/esm/mechanical_engineering.s048/kalpakjian/manu_eng_tech/pdf/Ch20.pdf.
- [21] Arroyo, E., Oliveros, M.J., López, M.A. *Mecánica del Corte*. (n. d.). Apuntes Tecnología de Fabricación Universidad de Zaragoza.
http://produccion.cps.unizar.es/info/tec_fabr/mec%20corte/Mecanica%20del%20corte.pps.
- [22] Imágenes: <http://138.100.80.137/wikifab/index.php/Portada>, (2009)
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/SteichenDrehen.jpg>
- [23] Documentos electrónicos: www.sciencedirect.com. (2009)
- [24] Material INCONEL718: www.matweb.com.
<http://www.americanspecialmetals.com/inconel.html>.



- [25] A. Molinari., C. Musquar and G. Sutter (2002). Adiabatic shear banding in high speed machining of Ti–6Al–4V: experiments and modeling. *International Journal of Plasticity* Volume 18 pp.443–459.
- [26] Nascimiento, Marcelino P., Voorwald, Herman J. C., Gamarra-Rosado, Víctor O (2003). Efectos Del Proceso de Soldadura *Tig* en la resistencia a ensayos por fatiga del Acero Aeronáutico Abnt 4130. *Revista Latino Americana de Metalurgia y Materiales*. Volume 23, pp.36-44.
http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522003000200005&lng=es&nrm=iso

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis *padres (Ino y M^aAngeles)* y *hermana (Maria)* el apoyo recibido durante estos años, sin su ayuda y esfuerzo esto no hubiese sido posible. También me gustaría recodar en estos agradecimientos a mis *amigos* de toda la vida y a los que he conocido gracias a elección de estos estudios que ya finalizo y de esta escuela que ya abandono. Es de agradecer también la comprensión y dedicación profesional y humana que me ha demostrado mi *tutor Xavier Soldani*.